

Vakuumtechnik

**Meßregeln für Dampfstrahlvakuumumpen
und Dampfstrahlkompressoren**

Treibmittel: Wasserdampf

DIN
28 430

Vacuum technology; methods of measurement for steam jet vacuum pumps and steam jet compressors; driving medium steam

Technique du vide; Normes de mesure relatives aux pompes à vide à jet de vapeur et aux compresseurs à jet de vapeur; Fluide moteur: vapeur d'eau

Der Inhalt dieser Norm geht zurück auf das VDMA-Einheitsblatt 24 294 Blatt 1 und Blatt 2, April 1971. Bei der Überführung des Inhalts in eine DIN-Norm wurde dieser überarbeitet und dem Stand der Technik angepaßt.

Meßregeln mit gleicher Zielsetzung liegen vor beim Heat Exchange Institute, Cleveland (HEI) und der Association Française de Normalisation, Paris-La Défense (AFNOR).

Bei Anwendung dieser Norm zur Berechnung von Dampfmassenströmen durch Düsen können sich gegenüber den vom HEI und AFNOR festgelegten Werten geringfügige Abweichungen ergeben. Diese sind in der PNEUROP-Empfehlung 6601 Anwendung nationaler Normen für die Abnahme und die Leistungsmessung von Dampfstrahl-Vakuum-pumpen und Dampfstrahl-Verdichtern 1978 ¹⁾ beschrieben.

Inhalt

	Seite		Seite
1 Anwendungsbereich und Zweck	2	4.3 Temperaturmessungen	7
2 Begriffe, Einheiten und Formelzeichen	2	4.4 Bestimmung von Massenströmen	7
3 Grundlagen für Berechnung und Messungen	3	5 Messen und Auswerten	8
3.1 Äquivalente Saugströme bei ein- und mehrstufigen Dampfstrahlvakuumumpen ohne Zwischenkondensatoren	3	5.1 Vorbereitung der Messungen	8
3.2 Saugmedien bei mehrstufigen Dampfstrahlvakuumumpen mit Zwischenkondensatoren	3	5.2 Meßanordnungen	8
3.3 Bestimmung von Massenströmen	4	5.3 Bedingungen während des Messens	8
3.4 Saugtemperatur	6	5.4 Meßgrößen und Auswerten der Messungen	8
3.5 Treibdampftemperatur	6	6 Theoretische Grundlagen	9
4 Meßverfahren und Meßinstrumente	6	6.1 Massenstromgleichung	9
4.1 Druckmessung im Gebiet $p > 1$ bar (Überdruckgebiet)	6	6.2 Luftstromberechnung nach Gleichung	9
4.2 Druckmessung im Gebiet $p < 1$ bar (Vakuumbereich)	7	6.3 Arbeitsblätter für kritischen Luftstrom	10
		6.4 Unterkritischer Luftstrom	10
		Bilder	11
		Zitierte Normen und andere Unterlagen	26

1) PNEUROP = Europäisches Komitee der Hersteller von Kompressoren, Vakuumumpen und Druckluftwerkzeugen. Die Empfehlung bzw. VDMA-Einheitsblatt ist zu beziehen bei Maschinenbau-Verlag GmbH, Lyoner Straße 18, 6000 Frankfurt 71.

Fortsetzung Seite 2 bis 26

Normenausschuß Vakuumtechnik (NAV) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
Normenausschuß Maschinenbau (NAM) im DIN

Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung des DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, gestattet.

1 Anwendungsbereich und Zweck

Diese Meßregeln für Dampfstrahlvakuumumpfen und Dampfstrahlkompressoren geben Grundlagen und praktische Verfahren zur Prüfung von ein- und mehrstufigen, mit Wasserdampf als Treibmittel arbeitende Dampfstrahlvakuumumpfen jeder Größe, zum Fördern und Verdichten von Gasen und Dämpfen an. Sie sollen die Einheitlichkeit der Durchführung und Auswertung der Messungen, die Beschaffenheit und Anordnung der Meßinstrumente und die Ausführung der notwendigen Berechnungen sicherstellen. Der Text der Norm bezieht sich auf Dampfstrahlvakuumumpfen. Bei Anwendung des Textes auf Dampfstrahlkompressoren ist entsprechend zu verfahren.

Messungen an Dampfstrahlvakuumumpfen sollen nachweisen, daß die vom Lieferer gegebenen Zusagen über Leistung, Dampf- und Wasserverbrauch unter den geforderten Bedingungen erfüllt sind. Aufgabe der Meßregeln ist es, unabhängig vom Fabrikat gleiche Voraussetzungen für die Durchführung und die Beurteilung der Messungen zu schaffen. Wenn das angesaugte Medium beim Abnahmeversuch in seiner Zusammensetzung und seiner Temperatur nicht mit den sicherzustellenden Angaben übereinstimmt, sollen die Meßregeln die Ermittlung einer äquivalenten Leistung ermöglichen. Durch ihre Zuverlässigkeit und Genauigkeit, die auf langjährigen in- und ausländischen Untersuchungen beruhen, sollen die Abnahmeregel dem Käufer und dem Lieferer Sicherheit geben, daß die danach geprüften Dampfstrahlvakuumumpfen im Betrieb des Käufers das sicherzustellende Betriebsverhalten zeigen. Bei Gutachten über Dampfstrahlvakuumumpfen sollen sich die Sachverständigen dieser Meßregeln bedienen.

Diese Meßregeln gelten für Messungen, die sowohl auf dem Prüfstand des Lieferers als auch am Aufstellungsort beim Käufer durchgeführt werden. Die Messung auf dem Prüfstand des Lieferers wird empfohlen, weil der Käufer selten die nach den Meßregeln notwendigen Einrichtungen in vorgeschriebener Ausführung bereitstellen kann.

Einstufige und mehrstufige Dampfstrahlvakuumumpfen ohne Zwischenkondensatoren sollen im Ganzen geprüft werden. Mehrstufige Dampfstrahlvakuumumpfen mit Zwischenkondensation nur dann, wenn die in Abschnitt 3.2 dafür genannten Bedingungen erfüllt sind; andernfalls können sie stufenweise geprüft werden.

2 Begriffe, Einheiten und Formelzeichen

2.1 Für die Benennung der Teile einer Dampfstrahlvakuumpumpe gilt DIN 24 291.

Im Bereich dieser Meßregeln gelten folgende Begriffe:

Treibdampf ist der durch die Treibdüse strömende Wasserdampf

Saugmedium ist das durch den Sauganschluß strömende Medium

Wasserdampf ist trockengesättigter oder überhitzter Wasserdampf

Gas ist ein Einzelgas oder ein Gemisch aus verschiedenen Gasen einschließlich Luft, jedoch ohne Wasserdampf

Luft ist die den Rechnungsgängen nach dieser Norm zugrunde liegende trockene Luft

Beim Messen mit atmosphärischer Luft von Raumtemperatur erzielt man ausreichende Genauigkeit.

Massenstrom ist die in der Zeiteinheit durch einen Querschnitt strömende Masse

Volumenstrom ist das in der Zeiteinheit durch einen Querschnitt strömende Volumen

Treibdampfstrom ist der Massenstrom des Treibdampfes

Saugstrom ist der Massenstrom des Saugmediums

Teilstrom ist ein bestimmter Anteil des Saugstromes

Äquivalenter Saugstrom ist ein Saugstrom, der einen gegebenen Saugstrom anderer Zusammensetzung und anderer Temperatur bei gleichbleibendem Treibdampfzustand und Gegendruck ersetzen kann, ohne daß sich der Saugdruck ändert

Raumluftäquivalent ist ein äquivalenter Luftsaugstrom von 20 °C

Kühlwasserstrom ist ein Massenstrom des Kühlwassers im Eintrittsstutzen eines Zwischenkondensators

Treibdampfverbrauch ist die Summe der Treibdampfströme aller Dampfstrahlvakuumumpfenstufen

Kühlwasserverbrauch ist die Summe der Kühlwasserströme aller Zwischenkondensatoren

Treibdampfdruck ist ein absoluter statischer Druck des Treibdampfes unmittelbar vor dem Treibanschluß

Saugdruck ist ein absoluter statischer Druck des Saugmediums unmittelbar vor dem Sauganschluß

Gegendruck ist ein absoluter statischer Druck des austretenden Gemisches unmittelbar hinter dem Druckanschluß

Treibdampftemperatur ist die Temperatur des Treibdampfes unmittelbar vor dem Treibanschluß

Saugtemperatur ist die Temperatur des Saugmediums unmittelbar vor dem Sauganschluß

Kühlwassertemperatur ist die Temperatur des Kühlwassers vor dem Eintrittsstutzen des Zwischenkondensators

2.2 Im Bereich dieser Meßregeln gelten die Formelzeichen und Einheiten nach Tabellen 1 bis 4.

In dieser Meßregel sind alle Drücke absolute Drücke (siehe DIN 1314).

Um Größengleichungen schreiben zu können, ist in dieser Meßregel in allen Gleichungen als Druckeinheit N/m² (100 N/m² = 1 mbar) einzusetzen.

In den Diagrammen und Beispielrechnungen dieser Meßregel ist als Druckeinheit mbar bzw. bar eingeführt, weil diese Einheiten als Meßwerte unmittelbar abgelesen werden.

Tabelle 1.

Formelzeichen	SI-Einheit	Benennung
ϑ	—	Temperaturfaktor der Äquivalentberechnung
χ	—	Molfaktor der Äquivalentberechnung
M_r	—	Relative Molekülmasse
$\dot{m}$	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	Massenstrom
$\dot{V}$	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	Volumenstrom
t	°C	Celsius-Temperatur
T	K	Kelvin-Temperatur
α	—	Düsenkoeffizient
ψ	—	Ausflußfunktion
d, D	m	Durchmesser
A	m ²	Querschnitt
p	N/m ²	Statischer Druck
p_s	N/m ²	Saugdruck
p_g	N/m ²	Grenzgegendruck
v	m ³ /kg	Spezifisches Volumen
ρ	kg/m ³	Dichte von Fluiden
κ	—	Isentropenexponent
Re	—	Reynolds-Zahl
R_i	$\frac{\text{J}}{\text{kg K}}$	Spezifische Gaskonstante
W	m/s	Strömungsgeschwindigkeit
η	Ns/m ²	Dynamische Viskosität
ν	m ² /s	Kinematische Viskosität
c	$\frac{\text{J}}{\text{kg K}}$	Spezifische Wärmekapazität

3 Grundlagen für Berechnung und Messungen

3.1 Äquivalente Saugströme bei ein- und mehrstufigen Dampfstrahlvakuumpumpen ohne Zwischenkondensatoren

Bei der Vielzahl der Saugmedien ist es nicht möglich, für alle denkbaren Fälle gleichartige Prüfgase und Berechnungsunterlagen bereitzuhalten. Man kann aber aufgrund umfangreicher Versuche [1], [2] und [3] unter der Voraussetzung gleichbleibender Drücke einen Saugstrom aus beliebigen Gasen in einfacher Weise auf einen für die Förderung in Dampfstrahlvakuumpumpen äquivalenten Saugstrom in Luft, Wasserdampf oder einem Gemisch beider umrechnen, wie auch umgekehrt. Deshalb wird die Prüfung von Dampfstrahlvakuumpumpen mit diesen Medien als gleichwertig anerkannt.

Die Faktoren, mit denen Saugströme in beliebige äquivalente Saugströme umgerechnet werden, sind in den Bildern 1, 2 und 3 enthalten; sie sind der zitierten Literatur entnommen.

Bild 1 dient zur Bestimmung des Temperaturfaktors ϑ für Gase, mit denen ein Saugstrom beliebiger Temperatur

in einen äquivalenten Saugstrom des gleichen Mediums anderer Temperatur umgerechnet werden kann. Man erhält den Äquivalentstrom durch Multiplikation des ursprünglichen Stromes mit dem Temperaturfaktor.

Bild 2 zeigt den gleichen Sachverhalt für das Saugmedium Wasserdampf.

Aus Bild 3 kann der Molfaktor χ entnommen werden, mit dem ein Saugstrom mit beliebiger relativer Molekülmasse und der Temperatur 20 °C in einen äquivalenten Saugstrom anderer relativer Molekülmasse und der Temperatur 20 °C umgerechnet werden kann. Man erhält den Äquivalentstrom durch Multiplikation des ursprünglichen Stromes mit dem Molfaktor.

Die Umrechnung auf eine andere relative Molekülmasse darf nur mit den Zahlenwerten für die Temperatur von 20 °C vorgenommen werden.

Wie der Unterschied zwischen Bild 1 und Bild 2 zeigt, wirkt sich die Temperatur bei Gasen anders aus als bei Wasserdampf. Andere Dämpfe als Wasserdampf sind wie Gase nach Bild 1 umzurechnen. Gemische aus Wasserdampf und Gasen müssen getrennt umgerechnet werden.

Für die Umrechnung eines Saugstromes in einen äquivalenten Saugstrom anderer Temperatur und anderer relativer Molekülmasse ergibt sich damit folgender Rechenablauf:

1. Umrechnung des Saugstromes mit der Temperatur t_1 in einen äquivalenten Saugstrom mit der Temperatur $t = 20$ °C mit dem Temperaturfaktor ϑ_1
2. Umrechnung dieses so enthaltenen äquivalenten Saugstromes mit der relativen Molekülmasse M_{r1} in den äquivalenten Saugstrom mit der erforderlichen relativen Molekülmasse M_{r2} mit dem Molfaktor χ
3. Umrechnung dieses mit dem zweiten Schritt erhaltenen äquivalenten Saugstromes mit der Temperatur von 20 °C in einen äquivalenten Saugstrom mit der geforderten Temperatur t_2 mit dem Temperaturfaktor ϑ_2 .

Der dem Saugstrom $\dot{m}_1$ äquivalente Prüfstrom $\dot{m}_2$ ist dann:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 \cdot \vartheta_1 \cdot \chi \cdot \vartheta_2 \quad (1)$$

Beispiel:

Gegeben ist ein Gasstrom mit folgenden Daten:
 $t_1 = 385$ °C $M_{r1} = 143$, $\dot{m}_1 = 100$ kg/h

Gesucht ist der äquivalente Wasserdampfstrom ($M_{r2} = 18$) bei $t_2 = 120$ °C

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 \cdot \vartheta_1 \cdot \chi \cdot \vartheta_2$$

$$\vartheta_1 = 1,19 \text{ (Bild 1)}$$

$$\chi = 0,51 \text{ (Bild 3)}$$

$$\vartheta_2 = 0,940 \text{ (Bild 2)}$$

$$\dot{m}_2 = 100 \cdot 1,19 \cdot 0,51 \cdot 0,940$$

$$\dot{m}_2 = 57,05 \text{ kg/h}$$

3.2 Saugmedien bei mehrstufigen Dampfstrahlvakuumpumpen mit Zwischenkondensatoren

3.2.1 Gemisch aus Luft und Wasserdampf

Wenn das Betriebsmedium Luft, Wasserdampf oder ein Gemisch beider ist, muß bei einer mehrstufigen Dampfstrahlvakuumpumpe mit Zwischenkondensatoren, die im Ganzen geprüft wird, die Zusammensetzung und die Temperatur des Prüfsaugmediums mit den Auslegungswerten übereinstimmen.

3.2.2 Gemisch aus Gasen und Dämpfen

Sind andere Gase oder Gasgemische ohne oder mit kondensierbaren Anteilen zu fördern, so können mehrstufige Dampfstrahlvakuumpumpen mit Zwischenkondensatoren im Ganzen nur mit dem Saugmedium in betriebsmäßiger Zusammensetzung und bei übereinstimmender Temperatur geprüft werden.

Äquivalente Luft- und Wasserdampfströme dürfen nicht verwendet werden. Bei Benutzung abweichender äquivalenter Saugströme würde hier wie auch im Falle des Abschnittes 3.2.1 das Verhältnis zwischen kondensierbaren und nichtkondensierbaren Anteilen von Stufe zu Stufe wechseln und den Betriebsbedingungen der späteren Stufen nicht entsprechen. In solchen Fällen kann jede einzelne Stufe mit einem jeweiligen Äquivalenzsaugstrom wie eine einstufige Dampfstrahlvakuumpumpe geprüft werden.

3.3 Bestimmung von Massenströmen

Bei der Prüfung ein- oder mehrstufiger Dampfstrahlvakuumpumpen wird im allgemeinen als Saugmedium nur Luft, Dampf oder eine Mischung beider verwendet. Der Saugstrom, der sich später im Betrieb mit dem dort vorgesehenen Saugmedium einstellt, kann aus den Prüfergebnissen nach Abschnitt 3.1 berechnet werden.

Der Prüfsaugstrom wird mit HEI-Düsen [1] gemessen. Für Luftmessungen sind außerdem Schwebekörpermeßgeräte zugelassen. Für die Ermittlung des Treibdampfstromes wird die Treibdüse als Meßdüse verwendet.

3.3.1 Düsen des Heat Exchange Institute (HEI)

Spezielle Formelzeichen dieses Abschnittes sind:

Tabelle 2.

Zeichen	SI-Einheit	Benennung
d	m	Engster Düsendurchmesser
A	m ²	Engster Querschnitt
p	$\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$	Absoluter statischer Druck im engsten Düsenquerschnitt
p_1	$\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$	Absoluter statischer Druck vor der Düse
p_2	$\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$	Absoluter statischer Druck hinter der Düse
v_1	$\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	Spezifisches Volumen des strömenden Mediums vor der Düse
t_1	°C	Temperatur des strömenden Mediums vor der Düse
$\dot{m}_{\text{kr}}$	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	Massenstrom bei kritischem Druckverhältnis
ψ_{kr}	—	Ausflußfunktion bei kritischem Druckverhältnis
η_1	$\frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}$	Dynamische Viskosität der Luft vor der Düse
Re	—	Reynolds-Zahl einer Düsenströmung bezogen auf η_1 und d
R_L	$\frac{\text{J}}{\text{kg K}}$	Gaskonstante der Luft

3.3.1.1 Grundlagen

Die Gleichung für den Massenstrom durch eine Düse lautet:

$$\dot{m} = \alpha \cdot \psi \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{p_1}{v_1}} \quad (2)$$

In dieser Gleichung drückt der Düsenkoeffizient α den Einfluß der Reibung, die Ausflußfunktion ψ den Einfluß des Druckverhältnisses p/p_1 und der Ausdruck $\sqrt{2 p_1/v_1}$ den Einfluß des Zustandes vor der Düse aus.

Die theoretische Grundlage für diese Gleichung findet sich im Abschnitt 6.1. Es ist:

$$\psi = \sqrt{\frac{x}{x-1} \cdot \left[\left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{2}{x}} - \left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{x+1}{x}} \right]} \quad (3)$$

Das kritische Druckverhältnis an der Düse, bei dem sich gerade die kritische Geschwindigkeit (Schallgeschwindigkeit) im engsten Querschnitt einstellt, hat den Wert:

$$\left(\frac{p}{p_1} \right)_{\text{kr}} = \left(\frac{2}{x+1} \right)^{\frac{x}{x-1}} \quad (4)$$

Wenn das Verhältnis p_2/p_1 der gemessenen Drücke größer als das kritische ist, besteht unterkritische Strömung, das Druckverhältnis wird als unterkritisch bezeichnet. Der Druck im engsten Querschnitt ist dann gleich dem hinter der Düse gemessenen Druck, also

$$p = p_2$$

Sobald p_2/p_1 den kritischen Wert erreicht oder unterschreitet, besteht kritische Strömung.

In diesem Fall bleibt

$$\frac{p}{p_1} = \left(\frac{p}{p_1} \right)_{\text{kr}}$$

konstant, und der Massenstrom $\dot{m}_{\text{kr}}$ ändert sich nicht, wenn der Druck p_2 weiter absinkt, das Druckverhältnis p_2/p_1 also überkritisch wird. In diesem Fall nimmt die Ausflußfunktion ihren kritischen Wert

$$\psi_{\text{kr}} = \left(\frac{2}{x+1} \right)^{\frac{1}{x-1}} \cdot \sqrt{\frac{x}{x+1}} \quad (5)$$

an.

Luftmessungen lassen sich bei über- und unterkritischen Druckverhältnissen durchführen. Der Düsenkoeffizient α ist bei der Verwendung von HEI-Düsen für Luftmessung allein von Re abhängig und kann aus Bild 4 entnommen werden. Die Reynolds-Zahl ist bestimmt durch:

$$Re = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\dot{m}}{d \cdot \eta_1} \quad (6)$$

Die dynamische Viskosität η der Luft hängt nach Bild 5 von ihrer Temperatur t ab.

Für Wasserdampf sind die entsprechenden Verhältnisse durch Versuche bei überkritischer Strömung ausreichend geklärt. Danach hat sich das Produkt aus Düsenkoeffizient und Ausflußfunktion als konstant erwiesen und beträgt nach Loschge [5]:

$$\alpha \cdot \psi_{\text{kr}} = 0,459 \quad (7)$$

2) Loschge gibt seinen experimentell gefundenen Wert ψ_{max} der $\alpha \cdot \psi_{\text{kr}} \cdot \sqrt{2g}$ entspricht, mit 2,035 [5] an.

Deshalb darf mit Wasserdampf im Gegensatz zu Luft nur bei überkritischen Druckverhältnissen geprüft werden. Der Dampf muß vor der Düse trockengesättigt oder überhitzt sein. Allein in diesem Fall ist der Zahlenwert der Gleichung (7) gültig. Der Dampf bleibt dann auch bei weiterer Expansion infolge Kondensationsverzugs bis zum engsten Querschnitt trocken.

Bei überkritischen Druckverhältnissen kann die numerische Auswertung der Gleichung (2) und (5) für Luft und Wasserdampf mit den Daten der Tabelle 1 erfolgen.

Vor Beginn der Messung muß aus den gegebenen oder durch Äquivalentberechnung gewonnenen Daten die zweckmäßig zu verwendende Meßdüsengröße ermittelt werden. In diesem Fall löst man die Gleichung (2) nach A auf, berechnet den engsten Querschnitt und wählt damit die passende Düsengröße.

3.3.1.2 Luftströme

Die Verwendung der Gleichung (2) bereitet bei der Berechnung eines Luftstromes insofern eine gewisse Schwierigkeit, als der Düsenkoeffizient α nach Bild 4 und Gleichung (7) selbst noch von der gesuchten Größe des Massenstromes abhängig ist. Im Abschnitt 6.2 ist ein geeigneter Rechengang angegeben.

Um die Rechnung zu vereinfachen, sind die Arbeitsblätter Bild 6 und Bild 7 geschaffen worden. Dabei sind die Grundeinheiten der Gleichung bereits in solche umgerechnet worden, die in der Praxis gebräuchlich sind. Bild 6 gilt für die HEI-Düsen Nr 1 bis 5, Bild 7 für die HEI-Düsen Nr 6 bis 10. Diese Blätter gestatten die Ablesung des Luftstromes $\dot{m}_{L,kr}$ bei überkritischem Druckverhältnis aus den Meßwerten t_1, p_1 und der Düsengröße, wie für die Zahlenbeispiele aus dem Verlauf der gestrichelten Linienzüge in Richtung der eingezeichneten Pfeile ersichtlich ist. Das Verhältnis des unterkritischen Massenstromes $\dot{m}_L$ zum kritischen Massenstrom $\dot{m}_{L,kr}$ unter sonst gleichen Bedingungen kann aus dem weiteren Arbeitsblatt Bild 8 für das gemessene Druckverhältnis p_2/p_1 entnommen werden. Druckverhältnisse $p_2/p_1 > 0,99$ sollen an Meßdüsen für Luft nicht verwendet werden. Die theoretischen Grundlagen für die Bilder 6 und 7 finden sich im Abschnitt 6.3 und für Bild 8 im Abschnitt 6.4.

Zahlenbeispiel für Luft bei unterkritischem Druckverhältnis:

An der HEI-Düse Nr 2 mit engstem Durchmesser $d = 2,38$ mm wurden folgende Werte gemessen:

Lufttemperatur $t_1 = 30$ °C, Druck vor der Düse $p_1 = 1000$ mbar, Druck hinter der Düse $p_2 = 866$ mbar.

Kontrolle des Druckverhältnisses:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{866}{1000} = 0,866 > \left(\frac{p}{p_1}\right)_{kr}, \text{ also unterkritisch}$$

In Bild 6 ergibt sich der kritische Massenstrom aus dem Verlauf des gestrichelten Linienzuges:

$$\dot{m}_{L,kr} = 3,60 \text{ kg/h}$$

aus Bild 8 mit $p_2/p_1 = 0,866$ das Massenstromverhältnis:

$$\frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_{L,kr}} = 0,695$$

und damit der Massenstrom beim gemessenen Druck p_2 zu:

$$\dot{m}_L = 0,695 \cdot 3,60 = 2,50 \text{ kg/h}$$

3.3.1.3 Wasserdampfströme

Die Berechnung eines Wasserdampfstromes bei überkritischem Druckverhältnis kann ohne Schwierigkeiten nach Gleichung (2) mit Gleichung (7) erfolgen. In diesem Falle kann das spezifische Volumen v_1 des Dampfes aus einer Dampftafel oder einem Mollierdiagramm entnommen werden. Zur Erleichterung der Rechnung wurden, ähnlich wie für Luft, entsprechende Arbeitsblätter Bild 9 und Bild 10 geschaffen. Bild 9 ist verwendbar für HEI-Düsen Nr 1 bis 4 und Bild 10 für HEI-Düsen Nr 5 bis 10.

Zahlenbeispiele für Wasserdampf bei überkritischem Druckverhältnis:

Beispiel 1:

Ermittlung der passenden Düsengröße

Eine Dampfstrahlvakuumpumpe soll mit Dampf als Saugmedium geprüft werden. Es ist ein Saugstrom von $\dot{m}_{D,kr} = 18$ kg/h bei einem Saugdruck von 0,5 bar gefordert. Zur Verfügung steht Dampf von 6 bar mit einer Temperatur $t_1 = 250$ °C. Geht man in Bild 9 von dieser Temperatur aus senkrecht nach oben bis zum Schnittpunkt mit der Linie 6 bar und von diesem waagrecht nach rechts, so schneidet diese Waagerechte die Senkrechte von $\dot{m}_{D,kr} = 18$ kg/h in einem Punkt, der zwischen den beiden Linien der Düsennummern 2 und 3 liegt. Es wird die nächst größere Düse, in diesem Fall Nr 3, gewählt.

Beispiel 2:

Ermittlung des effektiven Massenstromes $\dot{m}_{D,kr}$ aus Messungen

An der HEI-Düse Nr 3 mit engstem Durchmesser $d = 3,17$ mm wurden folgende Werte gemessen:

Dampf Temperatur vor der Düse $t_1 = 250$ °C, Druck vor der Düse $p_1 = 5$ bar, Druck hinter der Düse $p_2 = 0,5$ bar.

Kontrolle des Druckverhältnisses:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{0,5}{5,0} = 0,1 < \left(\frac{p}{p_1}\right)_{kr}, \text{ also überkritisch.}$$

In Bild 9 ergibt sich der Dampfstrom aus dem Verlauf des gestrichelten Linienzuges:

$$\dot{m}_{D,kr} = 19,07 \text{ kg/h}$$

3.3.1.4 Gemischströme aus Luft und Wasserdampf

Soll ein Gemisch aus Luft und Wasserdampf angesaugt werden, so wird der Teilstrom Luft und der Teilstrom Dampf getrennt gemessen. Danach werden beide Teilstrome in einer Mischkammer nach Abschnitt 5.2.1, Bild 14, vor dem Ansaugstutzen der Dampfstrahlvakuumpumpe vereinigt. Durch eine Untersuchung [6] wurde sichergestellt, daß beim Mischen von Wasserdampf mit kälterer Luft unter den üblichen Bedingungen an Dampfstrahlvakuum pumpen normalerweise kein Kondensat als Nebel ausfällt, und daß im extremen Fall niedriger Luft- und Dampftemperaturen, hohen Saugdruck und ungünstigen Mischungsverhältnisses so geringe Spuren von Kondensat auftreten, daß sie vernachlässigbar sind.

3.3.2 Düse der Dampfstrahlvakuum pumpen

Der Treibdampfstrom wird mit der Treibdüse der Dampfstrahlvakuumpumpe ausschließlich bei überkritischem Druckverhältnis bestimmt. Er kann nach Abschnitt 3.3.1.1 berechnet oder nach Abschnitt 3.3.1.3 aus dem Arbeitsblatt Bild 9 ermittelt werden. Im letzten Fall verwendet

man die zusätzliche Düsenlinie für 1 mm² Querschnitt und multipliziert den damit gewonnenen Wert $\dot{m}_D$, $\dot{m}_L$ mit dem engsten Treibdüsenquerschnitt A in mm².

3.4 Saugtemperatur

Spezielle Formelzeichen dieses Abschnittes sind:

Tabelle 3.

Zeichen	SI-Einheit	Benennung
t_s	°C	Saugtemperatur
t_D	°C	Temperatur des Wasserdampfes vor der Mischung
t_L	°C	Temperatur der Luft vor der Mischung
$c_{p,D}$	$\frac{J}{kg \cdot K}$	Mittlere spezifische Wärmekapazität des Dampfes bei konstantem Druck
$c_{p,L}$	$\frac{J}{kg \cdot K}$	Mittlere spezifische Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck
$\dot{m}_D$ und $\dot{m}_L$ wie im Abschnitt 2.1		

Eine genaue Temperaturmessung bei geringer Dichte des Saugmediums ist schwierig. Deshalb soll die Temperatur im Sauganschluß der Dampfstrahlvakuumpumpe aus dem Zustand vor den Meßgeräten zur Bestimmung des Saugstromes ermittelt werden. Bei Luft als Saugmedium wird die Temperatur vor dem Meßgerät gemessen und als identisch mit der Saugtemperatur der Dampfstrahlvakuumpumpe angesehen. Die geringe Temperaturänderung durch Drosselung im Meßgerät kann vernachlässigt werden.

Bei Wasserdampf als Saugmedium wird die spezifische Enthalpie (Wärmeinhalt) für den Dampfzustand vor dem Meßgerät und die Saugtemperatur bei gleicher spezifischer Enthalpie für den Dampfdruck hinter dem Meßgerät aus dem Mollierdiagramm entnommen. Der Ausgangsdampf muß wasserfrei sein.

Bei einem Wasser-Luft-Gemisch wird die Saugtemperatur t_s nach der folgenden Gleichung berechnet. Sie ergibt sich als Mischtemperatur aus der Wärmebilanz der sich mischenden Teilströme:

$$t_s = \frac{\dot{m}_D \cdot c_{p,D} \cdot t_D + \dot{m}_L \cdot c_{p,L} \cdot t_L}{\dot{m}_D \cdot c_{p,D} + \dot{m}_L \cdot c_{p,L}} \quad (8)$$

Beispiel:

Dampf Temperatur vor der Meßdüse 190 °C, [Druck vor der Düse 10 bar], Lufttemperatur der Umgebung $t_L = 21$ °C, Dampfstrom $\dot{m}_D = 100$ kg/h, Luftstrom $\dot{m}_L = 50$ kg/h, Saugdruck der Dampfstrahlvakuumpumpe 0,1 bar.

Für den vorstehenden Dampfzustand ergibt sich aus dem Mollierdiagramm für Wasserdampf eine spezifische Enthalpie von 2805 kJ/kg und bei gleicher spezifischer Enthalpie und einem Dampfdruck von 0,1 bar eine Saugtemperatur des Dampfteilstromes von 158 °C. Durch die Mischung mit Luft von der oben angegebenen Temperatur entsteht nach Gleichung (8) eine Saugtemperatur des Gemisches:

$$t_s = \frac{100 \cdot 1947 \cdot 158 + 50 \cdot 1009 \cdot 21}{100 \cdot 1947 + 50 \cdot 1009} = 130 \text{ °C}$$

3.5 Treibdampf Temperatur

Die Treibdampf Temperatur muß im allgemeinen gemessen werden. Nur wenn es sich um Satteldampf handelt und der

Satteldampfzustand auf andere Weise nachgewiesen ist, kann sie auch aus der Druckmessung und der Dampfdrucktafel hergeleitet werden. Aus der Feststellung einer nur geringen Überhitzung kann allein nicht mit Sicherheit auf Wasserfreiheit des Dampfes geschlossen werden.

4 Meßverfahren und Meßinstrumente

4.1 Druckmessung im Gebiet $p > 1$ bar (Überdruckgebiet)

4.1.1 Meßverfahren

Zur Bestimmung des absoluten Druckes wird der Differenzdruck zum atmosphärischen Druck gemessen. Letzterer darf nur dann als Festwert angenommen werden, wenn die geforderte Meßgenauigkeit es zuläßt (Bestimmung des atmosphärischen Druckes siehe Abschnitt 4.2.2).

Die Meßgeräte sollen so ausgewählt werden, daß eine Meßunsicherheit von ± 2 % des Anzeigewertes nicht überschritten wird. Insbesondere darf durch eine höhere Temperatur der Meßstelle das Meßergebnis nicht verfälscht werden. Gegebenenfalls muß durch eine Vorlage dafür gesorgt werden, daß das Meßgerät nicht unmittelbar mit dem heißen Strömungsmittel in Berührung kommt.

Geeignet sind folgende Meßgeräte:

U-Rohrmanometer für Überdrücke von 0 bis 2 bar

Federmanometer für Überdrücke von mehr als 0,3 bar

4.1.2 Quecksilber-U-Rohrmanometer

Der Differenzdruck zur Atmosphäre wird aus dem Spiegelhöhenunterschied der Sperrflüssigkeit in den beiden Schenkeln bestimmt. Kondensiert das Medium in der Zuleitung zum Meßgerät, so muß die Höhe der Kondensatschicht unter Berücksichtigung des Verhältnisses der Dichten zur Höhe der Quecksilbersäule hinzuaddiert werden.

Um den Kapillaritätseinfluß auszuschalten, müssen die Schenkelinnendurchmesser gleich sein oder dürfen 8 mm nicht unterschreiten.

4.1.3 Wasser-U-Rohrmanometer

Im Druckbereich zwischen 1 und 1,5 bar, vorzugsweise 1 und 1,3 bar, können U-Rohrmanometer mit Wasserfüllung verwendet werden. An die Stelle von Glasrohren können durchsichtige Kunststoffschläuche treten. Falls es die Meßgenauigkeit erfordert, ist die Temperatur des Sperrwassers zu berücksichtigen. Der Schenkelinnendurchmesser am Ablesabschnitt muß mindestens 15 mm betragen.

4.1.4 Federmanometer

Federmanometer enthalten ein Meßglied, das unter Druck elastisch verformt wird und die Verformung an einer kalibrierten Skala anzeigt. Grundsätzlich sind Manometer zu verwenden, die keinen Nullpunkt-Anschlag besitzen, unterdrückbar sind, und die keinen Endwert-Anschlag besitzen.

Sogenannte Mano-Vakuummeter mit einem Meßbereich vom Vakuum zum Überdruck sind daher geeignet.

Der zulässige Verwendungsbereich ist nach oben bei Ruhstellung durch drei Viertel, bei Wechselbelastung durch zwei Drittel des Skalenendwertes begrenzt. Zusammen mit der Forderung einer Meßunsicherheit von ± 2 % des Anzeigewertes ergibt sich daraus, daß nur Manometer der Klasse 1 bzw. 0,6 verwendet werden können, also Manometer, deren Fehlergrenzen ± 1 bzw. $\pm 0,6$ % des Skalenendwertes betragen.

4.2 Druckmessung in Gebiet $p < 1$ bar (Vakuumbereich)

4.2.1 Meßverfahren

Es dürfen nur Meßgeräte verwendet werden, deren Fehler bekannt sind. Die Meßgeräte sind möglichst so zu wählen, daß der Druck definitionsgemäß als Kraft gemessen wird, die auf eine Flächeneinheit wirkt. Nach Möglichkeit soll der Druck durch Ausmessung eines Flüssigkeitsspiegelunterschiedes zu einem Vergleichsdruck bestimmt werden. Beim McLeod-Meßgerät ergibt sich der Vergleichsdruck aus den Geräteabmessungen. In allen anderen Fällen, z. B. bei einem Membranvakuummeter ist eine Kontrolle vor und nach der Messung mit einem Gerät, das nach dem oben genannten Prinzip arbeitet, erforderlich.

Die Meßgeräte müssen so gewählt werden, daß im Druckbereich 1000 bis 100 mbar eine Meßunsicherheit von $\pm 2\%$ des Meßwertes nicht überschritten wird. Im Bereich 100 bis 0,01 mbar darf die Abweichung $\pm 5\%$ des Meßwertes betragen. Druckveränderungen von 10 % müssen innerhalb von 5 Sekunden angezeigt werden. In Tabelle 6 sind geeignete Meßgeräte mit ihren Meßbereichen angegeben.

4.2.2 Offenes U-Rohrvakuummeter

Mit diesem Gerät wird die Druckdifferenz zur Atmosphäre aus dem Spiegelhöhenunterschied der Sperrflüssigkeit in einem U-Rohr festgestellt. Zur Bestimmung des absoluten Druckes muß der atmosphärische Druck bekannt sein. Ist kein Quecksilberbarometer vorhanden und liegt für den Meßort keine amtliche Angabe vor, wird die U-Säule mit Quecksilberfüllung durch Evakuieren eines Schenkels auf einen Enddruck $p \leq 0,01$ mbar als Barometer eingesetzt. Kontrolle des Enddruckes durch McLeod-Vakuummeter nach Abschnitt 4.2.4 mit einer Mindestskalanzeige von 0,005 mbar. Die abgelesenen Werte werden entsprechend der Quecksilbertemperatur in mbar umgerechnet. Der Schenkeldurchmesser am Ableseabschnitt muß bei Quecksilberfüllung mindestens 8 mm, bei Wasserfüllung mindestens 15 mm betragen.

4.2.3 Geschlossenes U-Rohrvakuummeter

Das geschlossene U-Rohrvakuummeter enthält Quecksilber als Meßflüssigkeit. Der geschlossene Schenkel ist auf den Dampfdruck des Quecksilbers evakuiert, so daß annähernd gegen den Druck Null gemessen wird. Damit ergibt sich der Druck direkt aus der Höhendifferenz der Flüssigkeitsspiegel. Um den Kapillartätseinfluß auszuschalten, müssen die Schenkelinnendurchmesser gleich sein oder 8 mm nicht unterschreiten.

4.2.4 Kompressionsvakuummeter, z. B. McLeod-Vakuummeter

Mit dem Kompressionsvakuummeter werden Drücke unter 10 mbar gemessen.

Bei Anwesenheit von Dämpfen, die beim Komprimieren kondensieren können, wird das Meßergebnis verfälscht. Um diesen Fehler auszuschalten, sollen zwei Geräte oder ein Mehrskalengerät verwendet werden, mit denen bzw. dem der gleiche Druck bei zwei verschiedenen Kompressionsverhältnissen gemessen werden kann. Stimmt das Ergebnis aus beiden Messungen überein, ist keine Kondensation aufgetreten. Die Kondensation kann durch Beheizen des gesamten Meßgerätes auf mindestens die Temperatur verhindert werden, die als Kondensationstemperatur dem Druck in der Meßkapillare entspricht. Dieser ist als Summe aus dem Anzeigedruck und dem der Quecksilberhöhendifferenz entsprechenden Druck bekannt. Zulässig ist dieses Verfahren, wenn der Anzeigedruck $p \geq 0,01$ mbar ist und die erforderliche Gerätetemperatur unter 60 °C liegt.

4.2.5 Membranvakuummeter

Ihr Meßprinzip beruht auf der Verformung einer elastischen Membran unter dem zu messenden Druck. Diese Auslenkung kann mechanisch, induktiv oder kapazitiv abgegriffen werden.

Membranvakuummeter mit kapazitivem oder induktivem Abgriff sind für Drücke $p > 0,001$ mbar, mit mechanischem Abgriff für Drücke $p > 1$ mbar einsetzbar.

Eine Kalibrierung vor und nach der Messung ist jedoch in jedem Fall erforderlich.

4.2.6 Öl-U-Rohrvakuummeter

Das Öl-U-Rohrvakuummeter ist ein U-Rohr mit Ölfüllung. Ein Schenkel des Gerätes wird mit einer Vakuumpumpe auf einen Druck $p \leq 0,01$ mbar evakuiert. Kontrolle durch McLeod-Vakuummeter mit einer Mindestskalanzeige von 0,005 mbar. Der andere Schenkel steht unter dem zu messenden Druck. Unter Vernachlässigung des Vergleichsdrucks ergibt sich der zu messende Druck unmittelbar aus der Spiegelhöhendifferenz der Flüssigkeiten in den beiden Schenkeln. Der lichte Schenkeldurchmesser am Ableseabschnitt soll mindestens 15 mm betragen. Der Dampfdruck der Meßflüssigkeit muß unter $5 \cdot 10^{-3}$ mbar liegen. Geeignet ist Butylphthalat, das bei 20 °C eine Dichte von 1050 kg/m³ und einen Dampfdruck von $4 \cdot 10^{-5}$ mbar besitzt. Mit der Messung darf erst begonnen werden, wenn das Öl in beiden Schenkeln entgast ist.

4.2.7 Öl-U-Rohrfeinmeßvakuummeter

Das Meßgerät unterscheidet sich vom Öl-U-Rohrvakuummeter durch eine Feinmeßeinrichtung zur Bestimmung des Spiegelhöhenunterschiedes der Flüssigkeitssäulen mit einer Fehlergrenze von $\pm 0,002$ mm. Dem Meßbereich entsprechend muß der Schenkel mit dem Vergleichsdruck durch eine Diffusionspumpe auf weniger als $5 \cdot 10^{-4}$ mbar evakuiert werden. Kontrolle durch McLeod-Vakuummeter mit kleinster Skalanzeige von 10^{-4} mbar. Bei diesem Vergleichsdruck muß der Dampfdruck der Meßflüssigkeit unter $2 \cdot 10^{-4}$ mbar liegen. Die Schenkeldurchmesser sollen mindestens 25 mm betragen.

4.3 Temperaturmessungen

4.3.1 Allgemeines

An die Meßunsicherheit der Temperaturmessung werden bei Dampfstrahlvakuum Pumpen keine hohen Anforderungen gestellt, weil die Ergebnisse wenig Einfluß auf die Beurteilung ihrer Leistung haben. Eine Ausnahme bildet die Kühlwassertemperatur, bei der jedoch meßtechnisch günstige Voraussetzungen bestehen, so daß in praktisch allen Fällen einfache Regeln ausreichend sind.

4.3.2 Meßgeräte

Gemessen wird mit Flüssigkeits-Glasthermometern. Die Skale der Thermometer hat °C-Teilung. Nach der zu messenden Temperatur ist der geeignete Anzeigebereich zu wählen. Für Messungen bis 110 °C sollen Thermometer mit Skalenwert 1 und oberhalb 110 °C mit Skalenwert 2 benutzt werden. Fehlergrenzen nach dem Eichgesetz § 889.

4.4 Bestimmung von Massenströmen

4.4.1 Meßdüsen für Saugströme

Zur Bestimmung von Saugströmen werden HEI-Düsen verwendet, die nach ihrer Größe von 1 bis 10 nummeriert sind. Ihre Maßverhältnisse sind aus Bild 11 zu ersehen, sie entsprechen denen der „ASME Long Radius Flow Nozzles“. Die für den üblichen Meßbereich von Saugströmen vorgesehenen Düsengrößen sind in ihren engsten Durchmessern, deren Toleranzen und ihren Querschnitten in Tabelle 7 aufgeführt.

Die den Massenstrom begrenzenden Flächen müssen durch Bearbeitung mit Polierrot eine Oberfläche erhalten, in der mit bloßem Auge keine Unebenheiten mehr erkennbar sind. Die Auslaufkante muß scharf, aber ohne Grat sein. Das Einlaufprofil wird durch einen Ellipsenquadranten gebildet. An seinem Übergang zum zylindrischen Teil darf keine sicht- oder tastbare Kante vorhanden sein.

Bei Verwendung von U-Rohrmanometern oder U-Rohrvakuummetern darf die Differenz der Drücke vor und hinter der Meßdüse nicht weniger als 100 mm der verwendeten Meßflüssigkeit betragen.

4.4.2 Meßdüse für Treibdampfstrom

Der Treibdampfstrom wird mittels der Treibdüse der Dampfstrahlvakuumpumpe ausschließlich bei überkritischem Druckverhältnis bestimmt. Diese Düse als Meßgerät zu verwenden, ist berechtigt, weil ihre Herstellungsgüte und -genauigkeit die einer Präzisionsmeßdüse nicht übertrifft. Deshalb sind der Düsenkoeffizient und der wirkliche Durchfluß nie größer, als die Berechnung nach Abschnitt 3.3.1.3 ergibt. Abweichungen der Berechnung von den effektiven Verhältnissen können sich also nur zu Ungunsten des Verkäufers auswirken.

4.4.3 Schwebekörpermeßgerät für Luftsaugströme

Wenn das Fördermittel Luft ist, dürfen anstelle von HEI-Düsen nach Abschnitt 4.4.1 auch Schwebekörpermeßgeräte verwendet werden. Zugelassen sind Geräte, bei denen das Meßmedium, dessen Dichte oder Zustand beim Kalibrieren auf dem Meßrohr eingraviert sind und deren Fehlergrenzen innerhalb $\pm 3\%$ des angezeigten Luftstromes liegen.

Umrechnungen vom Kalibrierzustand auf den Betriebszustand sind nach den Angaben der Gerätehersteller vorzunehmen.

4.4.4 Kühlwasserstrom

Für die Messung des Kühlwasserstromes sind alle direkten und indirekten Verfahren zulässig, deren Meßunsicherheit $\pm 5\%$ nicht übersteigt. Bei indirekten Meßverfahren soll im Zweifelsfall eine Kalibrierung vor dem Messen erfolgen. Als Verfahren seien u. a. genannt: Auslitern, Auswiegen, Messen mit Wasseruhr, mit Normdüse oder -blende nach DIN 1952.

5 Messen und Auswerten

5.1 Vorbereitung der Messungen

5.1.1 Allgemeines

Besondere Sorgfalt ist auf die Dichtheit der Flanschverbindungen und Verschraubungen zu verwenden. Dampfleitungen sind zu entwässern und, um Kondensatbildung so gering wie möglich zu halten, ausreichend zu isolieren.

Die Meßgeräte sollen den in Abschnitt 4 festgelegten Bedingungen entsprechen und geprüft sein. Sie sollen so angebracht werden, daß die Meßwerte gut abgelesen werden können.

5.1.2 Einbau von Überdruckmeßgeräten und Vakuummetern

Überdruckmeßgeräte und Vakuummeter sind möglichst nahe der Druckentnahmestelle anzubringen. Um Störungseinflüsse auszuschalten, soll der Druck aus einem geraden Leitungsstück mit ungestörter Strömung entnommen werden. Als Entnahmeöffnung ist eine Bohrung senkrecht zur Strömungsrichtung ohne Grat vorzusehen. Liegt die Temperatur des strömenden Mediums über 50°C , so muß das Überdruckmeßgerät oder Vakuummeter durch ein Sackrohr gegen Erwärmung geschützt werden.

5.1.3 Überdruckmeßgerät- und Vakuummeterleitungen

Die Verbindungsleitungen können bei Drücken über 1 mbar aus geeignetem Kunststoff, Gummi oder Kupfer bestehen. Bei niedrigeren Drücken dürfen nur Spezial-Hochvakuumschläuche, Kupfer- oder Glasrohre mit besonders für Vakuum geeigneten Flanschen oder mit kurzen Gummi- oder Kunststoffverbindungsstücken verwendet werden.

Der Mindest-Innendurchmesser beträgt 5 mm, bei Drücken unter 1 mbar 10 mm. Die Meßleitungen sollen ohne Durchhang und so kurz wie möglich ausgeführt werden. Das letztere gilt besonders für Schläuche bei niedrigen Drücken.

Um Kondensatpfropfen zu vermeiden, müssen undurchsichtige Leitungen regelmäßig belüftet werden. Wenn mit Kondensatanfall zu rechnen ist, sollen Kondensatscheider vorgesehen werden. Um Strömungen in den Verbindungsleitungen zu den Meßgeräten zu vermeiden, sind Kühlfallen oder chemische Trocknungseinrichtungen nicht zulässig.

5.1.4 Einbau von Thermometern

Thermometer sollen in dem Strom des zu messenden Strömungsmediums angebracht und so angeordnet sein, daß möglichst nur die Temperatur des zu messenden Mediums erfaßt wird. Wird das Thermometer in ein Thermometer-Schutzrohr gesteckt, so soll das Schutzrohr mit einer Flüssigkeit soweit gefüllt sein, daß nur die Thermometerkugel vollständig eingetaucht ist. Wenn die Temperatur des zu messenden Mediums um mehr als ungefähr 20 K von der Umgebungstemperatur abweicht, soll die Rohrleitung oder der Behälter in der Umgebung der Meßstelle isoliert sein.

5.2 Meßanordnung

Die in den Abbildungen zu den folgenden Unterabschnitten dargestellten Beispiele für die Anordnung der Meßgeräte sind nicht in allen Einzelheiten verbindlich. Sie können vielmehr in sinnvoller Weise anderen Gegebenheiten angepaßt werden.

5.2.1 Anordnung zur Ermittlung des Saugstromes

Zur Messung von Dampf- und Luftsaugströmen bei über- oder unterkritischen Druckverhältnissen sind die Meßanordnungen in den Bildern 12, 13, 14 und 15 maßgebend.

5.2.2 Anordnung bei ein- und mehrstufigen Dampfstrahlvakuumumpumpen

Die Anordnung der Meßeinrichtung bei ein- und mehrstufigen Dampfstrahlvakuumumpumpen mit und ohne Zwischenkondensatoren entspricht sinngemäß Abschnitt 5.2.1.

5.3 Bedingungen während des Messens

Die Meßbedingungen sollen im Rahmen der Meßgerädetoleranzen den Bedingungen entsprechen, für die die Dampfstrahlvakuumpumpe ausgelegt ist. Auf jeden Fall ist folgendes zu fordern:

- der Treibdampfdruck darf nicht niedriger,
 - die Treibdampf Temperatur nicht mehr als 30 K höher,
 - die Kühlwassertemperatur nicht höher,
 - der Kühlwasserstrom nicht geringer
- sein, als die entsprechenden Auslegungswerte. Der Treibdampf soll wasserfrei sein.

5.4 Meßgrößen und Auswerten der Messungen

5.4.1 Grenzgedruck

Der Saugstrom wird auf seinen gewollten Wert eingestellt, und der Gegendruck wird, von seinem Auslegungsdruck