



EUROPEAN COMMITTEE OF MANUFACTURERS OF COMPRESSORS, VACUUM PUMPS AND PNEUMATIC TOOLS
COMITE EUROPEEN DES CONSTRUCTEURS DE COMPRESSEURS, POMPES A VIDE ET OUTILS A AIR COMPRI ME
EUROPÄISCHES KOMITEE DER HERSTELLER VON VERDICHTERN, VAKUUMPUMPEN UND DRUCKLUFTWERKZEUGEN

6601/1978

ACCEPTANCE SPECIFICATION AND PERFORMANCE TESTS FOR LIQUID RING VACUUM PUMPS

GENERAL SECRETARIAT

British Compressed Air Society
33/34 Devonshire Street
LONDON
W1N 1RF
Tel: 0171 935 2464
Fax: 0171 935 3077

Für die Abnahme und die Leistungsmessung von Dampfstrahl-Vakuumpumpen und Dampfstrahl-Verdichtern werden nebeneinander die folgenden bekannten nationalen Normen verwendet:

For the acceptance and capacity measurement of steam jet vacuum pumps and steam jet compressors the following known standards are used:

Les normes nationales ci-après s'appliquent à la réception et à la mesure de capacité des pompes à vide et des compresseurs à jet de vapeur:

AFNOR - Association Française de Normalisation
Paris/France
NF X 10 - 541. Technique du vide.
Essais de réception des éjecteurs à jet de vapeur d'eau.

HEI - Heat Exchange Institute
New York/USA
Standards for steam jet ejectors.

VDMA - Verein Deutscher Maschinenbau-Anstalten e.V.
Frankfurt am Main/Bundesrepublik Deutschland
VDMA 24 294 Blatt 1 und Blatt 2.
Dampfstrahl-Vakuumpumpen und Dampfstrahl-Verdichter; Messregeln, Arbeitsmittel.

Diese Normen enthalten Regeln für die Anwendung von Meßgeräten, Meßmethoden und Berechnungsgrundlagen. Die Regeln stimmen untereinander weitgehend überein. Lediglich die Berechnungen der Dampfmassenströme durch Düsen können in bestimmten Bereichen zu etwas voneinander abweichenden Ergebnissen führen. Das gilt sowohl für Treibdampfströme, die aus dem Treibdampfzustand und dem Treibdüsendurchmesser berechnet werden, als auch für Dampfströme, die einer Dampfstrahl-Vakuumpumpe als Saugstrom zugeleitet werden und aus dem jeweiligen Dampfzustand und dem Durchmesser einer Meßdüse zu ermitteln sind.

These standards consists of rules for the use of measuring instruments, measuring methods and design fundamentals. The rules largely correspond to each other, but the calculations of the steam flow rate through nozzles in certain ranges. This applies to the motive steam flows which are calculated accordance to the state of the motive steam and the diameter of the motive nozzle as well as to the steam flows being led to the steam jet vacuum pumps as suction flow and determined by the respective state of the steam and the diameter of a flow nozzle.

Ces normes comprennent les règles concernant l'utilisation d'appareils de mesure, les méthodes de mesure et les bases de calcul. En général, ces règles concordent entr'elles. Cependant, dans certains domaines, les calculs des débits massiques de vapeur passant à travers les tuyères donnent des résultats légèrement divergents. Ceci s'applique non seulement aux débits de vapeur motrice calculés à partir de l'état de vapeur motrice et du diamètre de la buse de poussée, mais encore aux débits de vapeur aspirés par une pompe à vide à jet de vapeur qui sont déterminés à partir de l'état de vapeur et du diamètre d'une tuyère de mesure.

In dieser PNEUROP-Veröffentlichung werden die Unterschiede der Berechnungsmethoden einander gegenübergestellt. Dabei sind die folgenden Ausgaben der Normen verglichen worden:

In this publication the differences of the calculation methods are compared with each other. The following publications of the standards have been taken into account:

Cette publication PNEUROP montre les différences entre les méthodes de calcul. Les éditions suivantes de normes ont été comparées:

AFNOR NF X 10 - 541 (Avril 1976)
HEI Standards for steam jet ejectors. Third edition. Reprint 1967.
VDMA 24 294 Blatt 1 und Blatt 2, April 1971

Die Formeln, Zeichen und Einheiten, die man jeweils für die Berechnung des Dampfmassenstromes durch Düsen verwendet, sind in Tabelle 1 aufgeführt.

The formulae, signs and units being used for the calculation of the steam flow rate through nozzles are stated in table 1.

Les formules, les indices et les unités utilisés pour le calcul du débit massique de vapeur passant à travers les tuyères sont représentés sur le tableau 1.

A F N O R		H E I		V D M A	
$q_m = B \cdot k \cdot k_1 \cdot A \cdot \sqrt{\frac{P_0}{V_0}}$		$W_s = 892,6 \cdot C \cdot D_n^2 \cdot \sqrt{\frac{P_1}{V_1}}$		$\dot{m} = a \cdot \psi_{kr} \cdot f \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{P_1}{V_1}}$	
q_m	kg/h débit masse de vapeur	W_s	lb/h steam flow rate	\dot{m}	kg/s Massenstrom
B	= 71,7 --- 75,3, coefficient	C	= 0,93 --- 1,00, coefficient	$a \cdot \psi_{kr}$	= 0,459
k	= 0,93 --- 1,02, coefficient de débit				
k_1	= 0,97 coefficient				
A	cm ² section au col de la tuyère	D_n	inch diameter of throat	f	m ² engster Querschnitt
P_0	bar pression statique absolue amont	P_1	lb/inch ² upstream static pressure (absolute)	P_1	N/m ² statischer Druck vor der Düse (abs.)
V_0	m ³ /kg volume massique de la vapeur aux conditions amont	V_1	ft ³ /lb upstream specific volume	V_1	m ³ /kg spez. Volumen des strömenden Mediums vor der Düse

Tabelle 1

Formeln für die Berechnung des Dampfstromes durch Düsen bei überkritischem Druckgefälle.

Table 1

Formulae for the calculation of the steam flow through nozzles at and above the critical pressure ratio.

Tableau 1

Formules pour le calcul du débit de vapeur passant par une tuyère dans les cas d'un écoulement critique.

Die Koeffizienten der Formeln sind unterschiedlich definiert. Verwendet man die Formelstruktur, die Zeichen und die Einheiten der AFNOR-Zahlenwertgleichung, so sind für Berechnungen, die zu einem Ergebnis entsprechend der HEI- oder der VDMA-Formel führen sollen, für den Term $(B \cdot k \cdot k_1)$ die jeweils in Tabelle 2 stehenden Zahlenwerte einzusetzen. Diese Werte sind aus den Koeffizienten der HEI- bzw. VDMA-Formel durch Umrechnung in die Struktur der AFNOR-Gleichung ermittelt worden. Da in den HEI-Standards unterschiedliche Berechnungsmethoden für Treibdüsen und für Meßdüsen zur Bestimmung des Saugstromes festgelegt sind, ergeben sich auch hier voneinander abweichende Werte des Terms $(B \cdot k \cdot k_1)$.

The coefficients of the formulae are defined differently. If the formula, signs and units of the AFNOR-equation are used, the figures of table 2 are to be inserted for term $(B \cdot k \cdot k_1)$ to give results corresponding to the HEI or VDMA-formula. These values have been derived from the coefficients of the HEI or VDMA-formula by conversion to the AFNOR-equation. As in the HEI standards different calculation methods have been used for a) motive nozzles and b) flow nozzles to determine the suction flow, different values of the term $(B \cdot k \cdot k_1)$ are obtained for a) and b).

La définition des coefficients des formules est différente. Lorsqu'on utilise la formule, les indices et les unités de l'équation AFNOR, il faut, dans les calculs, donner aux termes $(B \cdot k \cdot k_1)$ les valeurs numériques du tableau 2 pour obtenir un résultat suivant les formules HEI ou VDMA. Ces valeurs ont été déterminées à partir des coefficients des formules HEI ou VDMA par conversion de ces dernières dans l'équation AFNOR. Comme les standards HEI comprennent des méthodes différentes pour calculer les tuyères motrices et les tuyères de mesure du débit aspiré, il s'ensuit aussi des valeurs différentes des termes $(B \cdot k \cdot k_1)$.

Wendet man die Formelstrukturen, die Zeichen und die Einheiten der HEI-Gleichung an, um Ergebnisse nach AFNOR oder VDMA zu erzielen, so ist für den Koeffizienten C der entsprechende Wert aus Tabelle 3 einzusetzen.

Soll dagegen die Formelstruktur der VDMA-Gleichung unter Beibehaltung der dort üblichen Zeichen und Einheiten angewendet werden, um Ergebnisse auszurechnen, die den AFNOR- oder HEI-Normen entsprechen, so muß für den Term ($a \cdot \psi_{kr}$) der jeweilige Wert aus Tabelle 4 eingesetzt werden.

Wie die Zahlen in diesen Tabellen zeigen, ergeben sich bei den Rechnungsgängen nach HEI und VDMA für die Treibdüse praktisch die gleichen Werte. Für die Meßdüse betragen die Abweichungen in den zu berechnenden Dampfmasseströmen bis zu rund 3 %. Etwas größere Unterschiede können beim Vergleich der HEI- oder der VDMA-Werte mit Ergebnissen auftreten, die mit der AFNOR-Gleichung in bestimmten Druck-, Temperatur- und Düsendurchmesserbereichen errechnet werden.

When using the formulae, signs and units of the HEI-equation to obtain results acc. to AFNOR or VDMA the corresponding value of table 3 has to be used for coefficient C.

If, however, the formula of the VDMA-equation shall be employed by maintaining the usual signs and units, to calculate results which correspond to AFNOR or VDMA the appropriate value of table 4 must be used for term ($a \cdot \psi_{kr}$).

As the figures in these tables show, the calculations acc. to HEI and VDMA result in practically the same values for the motive nozzle. For the flow nozzle the deviations of the steam flow rate to be calculated amount to approx. 3 %. When comparing the HEI or VDMA values with the results which are calculated by the AFNOR-equation in certain pressure, temperature and nozzle diameter ranges, the differences may be somewhat bigger.

Lorsqu'on utilise les formules, les indices et les unités de l'équation HEI afin d'obtenir des résultats suivant AFNOR ou VDMA, il faut employer pour le coefficient C la valeur du tableau 3.

Si, pour obtenir des résultats correspondant aux normes AFNOR ou HEI, la formule de l'équation VDMA doit être appliquée en utilisant les indices et les unités de cette dernière, il faut employer pour les termes ($a \cdot \psi_{kr}$) la valeur du tableau 4.

Comme le montrent les chiffres de ces tableaux, on obtient pour la tuyère motrice pratiquement les mêmes valeurs en utilisant les opérations suivant HEI et VDMA. Pour la tuyère de mesure les écarts relatifs aux débits massiques de vapeur à calculer sont d'env. 3 %. Lorsqu'on compare les valeurs HEI ou VDMA avec les résultats obtenus par l'équation AFNOR en tenant compte des conditions déterminées de pression, de température et de diamètres de tuyère, des écarts légèrement plus élevés peuvent se produire.

A F N O R				H E I				V D M A											
1. Treib- düse Motive nozzle Tuyère motrice	Δt = Treibdampfüberhitzung Δt = motive steam super- heat Δt = Surchauffage de la vapeur motrice $B \cdot k \cdot k_1 = f(Re, \Delta t)$			$B \cdot k \cdot k_1 = 73,9$			$B \cdot k \cdot k_1 = 74,0$												
	Re \ Δt	$\Delta t < 30^\circ C$	$30 < \Delta t < 130$							$\Delta t > 130^\circ C$									
	10^4	65,9	67,1							69,2									
	10^5	68,9	70,2							72,3									
10^6	70,5	71,8	74,0																
2. Messdüse Flow nozzle Tuyère de me- sure	Δt = Dampfüberhitzung Δt = steam superheat Δt = Surchauffage de la vapeur $B \cdot k \cdot k_1 = f(Re, \Delta t)$			$B \cdot k \cdot k_1 = f(re)$			$B \cdot k \cdot k_1 = 74,0$												
	Re \ Δt	$\Delta t < 30^\circ C$	$30 < \Delta t < 130$							$\Delta t > 130^\circ C$									
	10^4	65,9	67,1							69,2									
	10^5	68,9	70,2							72,3									
10^6	70,5	71,8	74,0																
(siehe Diagramm Fig. 13 und Tabelle S. 5, AFNOR) (see diagram fig. 13 and table, page 5, AFNOR) (voir diagramme fig. 13 et tableau AFNOR, page 5)				<table border="1"> <thead> <tr> <th>Re</th> <th>10^4</th> <th>10^5</th> <th>10^6</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$B \cdot k \cdot k_1$</td> <td>71,5</td> <td>74,6</td> <td>76,4</td> </tr> </tbody> </table> (Stützwerte entsprechend Fig. 17, HEI) (values taken from fig. 17, HEI) (Coefficient suivant la fig. 17, HEI)				Re	10^4	10^5	10^6	$B \cdot k \cdot k_1$	71,5	74,6	76,4				
Re	10^4	10^5	10^6																
$B \cdot k \cdot k_1$	71,5	74,6	76,4																

Tabelle 2

Zahlenwerte für den Term $(B \cdot k \cdot k_1)$ bei der Anwendung der Struktur der AFNOR-Formel zur Berechnung von Ergebnissen, die der HEI-Formel bzw. der VDMA-Formel entsprechen sollen. (Einheiten wie bei AFNOR).

Table 2

Figures for the term $(B \cdot k \cdot k_1)$ when using the AFNOR-formula for the calculation of results which are to correspond to the HEI or VDMA-formula (units as AFNOR).

Tableau 2

Valeurs numériques des termes $(B \cdot k \cdot k_1)$ en utilisant la formule AFNOR pour parvenir aux résultats correspondant aux formules HEI ou VDMA. Mêmes unités que pour AFNOR.

H E I		A F N O R		V D M A																									
1. Treibdüse Motive nozzle Tuyère de mesure	$C = 0,97$	$C = f(Re, \Delta t)$ $\Delta t =$ Treibdampfüberhitzung $\Delta t =$ motive steam superheat $\Delta t =$ Surchauffage de la vapeur motrice	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Re \ Δt</th> <th>$\Delta t < 30^\circ C$</th> <th>$30 < \Delta t < 130$</th> <th>$\Delta t > 130^\circ C$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>10^4</td> <td>0,865</td> <td>0,880</td> <td>0,908</td> </tr> <tr> <td>10^5</td> <td>0,904</td> <td>0,921</td> <td>0,949</td> </tr> <tr> <td>10^6</td> <td>0,925</td> <td>0,942</td> <td>0,971</td> </tr> </tbody> </table>	Re \ Δt	$\Delta t < 30^\circ C$	$30 < \Delta t < 130$	$\Delta t > 130^\circ C$	10^4	0,865	0,880	0,908	10^5	0,904	0,921	0,949	10^6	0,925	0,942	0,971	$C = 0,971$									
Re \ Δt	$\Delta t < 30^\circ C$	$30 < \Delta t < 130$	$\Delta t > 130^\circ C$																										
10^4	0,865	0,880	0,908																										
10^5	0,904	0,921	0,949																										
10^6	0,925	0,942	0,971																										
2. Messdüse Flow nozzle Tuyère de mesure	$C = f(Re)$ <table border="1"> <thead> <tr> <th>Re</th> <th>10^4</th> <th>10^5</th> <th>10^6</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C</td> <td>0,938</td> <td>0,979</td> <td>1,003</td> </tr> </tbody> </table> <p>(Stützwerte entsprechend Fig. 17 HEI) (Values taken from fig. 17 HEI) (Coefficient suivant la fig. 17, HEI)</p>	Re	10^4	10^5	10^6	C	0,938	0,979	1,003	$C = f(Re, \Delta t)$ $\Delta t =$ Treibdampfüberhitzung $\Delta t =$ Steam superheat $\Delta t =$ Surchauffage de la vapeur	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Re \ Δt</th> <th>$\Delta t < 30^\circ C$</th> <th>$30 < \Delta t < 130$</th> <th>$\Delta t > 130^\circ C$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>10^4</td> <td>0,865</td> <td>0,880</td> <td>0,908</td> </tr> <tr> <td>10^5</td> <td>0,904</td> <td>0,921</td> <td>0,949</td> </tr> <tr> <td>10^6</td> <td>0,925</td> <td>0,942</td> <td>0,971</td> </tr> </tbody> </table> <p>(siehe Diagramm Fig. 13 und Tabelle S. 5, AFNOR) (See diagram fig. 13 and table page 5, AFNOR) (Voir diagramme fig. 13 et tableau AFNOR, page 5)</p>	Re \ Δt	$\Delta t < 30^\circ C$	$30 < \Delta t < 130$	$\Delta t > 130^\circ C$	10^4	0,865	0,880	0,908	10^5	0,904	0,921	0,949	10^6	0,925	0,942	0,971	$C = 0,971$	
Re	10^4	10^5	10^6																										
C	0,938	0,979	1,003																										
Re \ Δt	$\Delta t < 30^\circ C$	$30 < \Delta t < 130$	$\Delta t > 130^\circ C$																										
10^4	0,865	0,880	0,908																										
10^5	0,904	0,921	0,949																										
10^6	0,925	0,942	0,971																										

Tabelle 3

Zahlenwerte für den Koeffizienten C bei der Anwendung der Struktur der HEI-Formel zur Berechnung von Ergebnissen, die der AFNOR-Formel bzw. der VDMA-Formel entsprechen sollen. (Einheiten wie bei HEI)

Table 3

Figures for the coefficient C when using the HEI-formula to calculate the results which are to correspond to the AFNOR or the VDMA formula. (Units as HEI).

Tableau 3

Valeurs numériques du coefficient C en utilisant la formule HEI pour parvenir aux résultats correspondant aux formules AFNOR ou VDMA. (Mêmes unités que pour HEI).

V D M A		A F N O R				H E I				
1. Treibdüse Motive nozzle Tuyère motrice	$a \cdot \sqrt{V_{kr}} = 0,459$	$a \cdot \sqrt{V_{kr}} = f(Re, \Delta t)$ Δt = Treibdampfüberhitzung Δt = Motive steam superheat Δt = Surchauffage de la vapeur motrice				$a \cdot \sqrt{V_{kr}} = 0,458$				
		Re	Δt	$\Delta t < 30^\circ\text{C}$	$30 < \Delta t < 130$	$\Delta t > 130^\circ\text{C}$	Re	10^4	10^5	10^6
		10^4		0,409	0,417	0,43	$a \cdot \sqrt{V_{kr}}$	0,443	0,462	0,474
		10^5		0,428	0,436	0,449				
		10^6		0,438	0,446	0,459				
2. Meßdüse Flow nozzle Tuyère de mesure	$a \cdot \sqrt{V_{kr}} = 0,459$	$a \cdot \sqrt{V_{kr}} = f(Re, \Delta t)$ Δt = Treibdampfüberhitzung Δt = Steam superheat Δt = Surchauffage de la vapeur				$a \cdot \sqrt{V_{kr}} = f(Re)$				
		Re	Δt	$\Delta t < 30^\circ\text{C}$	$30 < \Delta t < 130$	$\Delta t > 130^\circ\text{C}$	Re	10^4	10^5	10^6
		10^4		0,409	0,417	0,43				
		10^5		0,428	0,436	0,449				
		10^6		0,438	0,446	0,459				
		(siehe Diagramm Fig. 13 und Tabelle S. 5, AFNOR) (see diagram fig. 13 and table page 5, AFNOR) (voir diagramme fig. 13 et tableau AFNOR, page 5)				(Stützwerte entsprechend Fig. 17 HEI) (values taken from fig. 17 HEI) (Coefficient suivant la fig. 17, HEI)				

Tabelle 4

Zahlenwerte für den Term $(a \cdot \sqrt{V_{kr}})$ bei der Anwendung der Struktur der VDMA-Formel zur Berechnung von Ergebnissen, die der AFNOR-Formel bzw. der HEI-Formel entsprechen sollen. (Einheiten wie bei VDMA).

Table 4

Figures for the term $(a \cdot \sqrt{V_{kr}})$ when using the VDMA-equation for the calculation of results which are to correspond to the AFNOR or the HEI-formula. (Units as VDMA).

Tableau 4

Valeurs numériques des termes $(a \cdot \sqrt{V_{kr}})$ en utilisant la formule VDMA pour parvenir aux résultats correspondant aux formules AFNOR ou HEI. (Mêmes unités que pour VDMA).

Zur Verdeutlichung der Rechnungsabläufe folgen zwei Zahlenbeispiele. In beiden Fällen wird der Dampf-massenstrom (Durchsatz) für eine Meßdüse berechnet, deren Durchmesser $d = 2,54$ mm beträgt. Im ersten Beispiel wird der Durchsatz entsprechend HEI errechnet, jedoch werden die Formelstruktur und die Einheiten verwendet, die bei VDMA üblich sind. Im zweiten Beispiel wird der Durchsatz entsprechend AFNOR ermittelt. Es werden jedoch die Formelstruktur und die Einheiten nach HEI benutzt.

To illustrate the calculating operations we give two examples. In both cases the steam flow rate is calculated for a flow nozzle with a diameter of $d = 2,54$ mm. However, the formula and the units which are usual for VDMA are used. In the second example the flow rate is determined acc. to AFNOR. However, the formula and the units acc. to HEI are used.

Ci-après deux exemples pour préciser ces opérations. Dans le deux cas, le débit massique de vapeur est calculé pour une tuyère de mesure de diamètre $d = 2,54$ mm. Dans le premier exemple, le débit est calculé suivant HEI mais en utilisant la formule et les unités de VDMA. Le deuxième exemple donne le débit suivant AFNOR mais en utilisant la formule et les unités de HEI.

Aufgabe	Massendurchsatzrechnung für eine Meßdüse	Berechnung nach HEI Formelstruktur und Einheiten nach VDMA	Berechnung nach AFNOR Formelstruktur und Einheiten nach HEI
Example	Mass flow rate for a flow nozzle	Calculation acc. to HEI	Calculation to AFNOR
Exemple	Calcul de débit massique d'une tuyère de mesure	Calculs suivant HEI, formules et unités suivant VDMA	Calculs suivant AFNOR, formules et unités suivant HEI
Gegeben	Meßdüse, engster Durchmesser		
known	flow nozzle, throat diameter	$\varnothing_d = 2,54 \cdot 10^{-3} \text{ m}$	$D_n = 0.1 \text{ inch}$
donné	" throat cross-sectional area	$f = 5,07 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$	
	Tuyère de mesure, diamètre au col		
	" " section au col		
	Wasserdampfstrom, gesättigt		
	water vapour flow, saturated		
	débit de vapeur d'eau saturée		
	absoluter Druck vor der Düse	$P_1 = 3,0 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$	$P_1 = 43.5 \text{ lb/inch}^2$
	upstream absolute pressure		
	Pression absolue amont		
	absoluter Druck am Düsenaustritt	$P_2 = 1,0 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$	$P_2 = 1.45 \text{ lb/inch}^2$
	absolute pressure at nozzle outlet		
	Pression absolue à la sortie de la tuyère		
	spez. Volumen vor der Düse	$v_1 = 0,6056 \text{ m}^3/\text{kg}$	$v_1 = 9.7 \text{ ft}^3/\text{lb}$
	upstream specific volume		
	Volume massique aux conditions amont		
	Temperatur vor der Düse	$T_1 = 406,7 \text{ K}$	$T_1 = 406.7 \text{ K}$
	upstream temperature		
	Température aux conditions amont		

(Fortsetzung Seite 8)
(Continued)
(Voir page 8)

(Fortsetzung)

Gesucht required Demandé	Durchsatz flow rate Débit		
Rechnungs- gang calcula- tion proce- dure Calcul	Es wird mit den Gleichungen für überkritische Gefälle gerechnet, da the flow rate is calculated using the equations for critical flow above the critical pressure ratio, be- cause On calcule avec les équations pour écoulement critique, car $P_2 / P_1 = 0,0333$		

<p>1. Iterations-schritt 1st Iteration step 1ère étape d'itération</p>	<p>Dabei muß iterativ vorgegangen werden, weil der Düsenverlustfaktor von der Reynoldszahl im engsten Querschnitt, diese wiederum von zu bestimmenden Massenstrom, abhängt. Die mit dem ersten Schritt berechnete Reynoldszahl kann jedoch nicht mehr als 10 % von der richtigen abweichen. Daraus ergibt sich ein max. möglicher Fehler bei zwei Iterations-schritten von 0,5 % in den Düsenverlustfaktoren.</p> <p>Zur Bestimmung eines ersten Näherungswertes für die Reynoldszahl Re wird der Durchsatz mit dem Schätzwert berechnet.</p> <p>Die dynamische Zähigkeit ist temperaturabhängig. Da bis zum engsten Querschnitt das kritische Druckverhältnis anliegt, ergibt sich die zugehörige Temperatur mit</p> <p>Mit dieser Temperatur kann man die Zähigkeit aus Tabellen (z.B. Properties of Water and Steam in SI-Units, Springer 1969) entnehmen.</p>	<p>Since the nozzle coefficient depends on the Reynolds number at the throat, which in turn depends on the unknown mass flow, an iterative procedure must be adopted. The Reynolds number calculated by the first step cannot deviate more than 10 % from the correct figure. This gives a max. possible error of 0,5 % in the nozzle coefficient with two iterations.</p> <p>For the determination of a first approximate value for the Reynolds number Re, the flow rate is calculated with an estimated value.</p> $a = 1, \text{ d.h. } a \cdot \gamma_{kr} = 0,473$ $\dot{m} = a \cdot \gamma_{kr} \cdot f \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{P_1}{V_1}}$ $= 0,473 \cdot 5,07 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{3 \cdot 10^5}{0,6056}}$ $= 2,38 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$ <p>The dynamic viscosity depends on the temperature. As there is a critical pressure ratio up to the throat cross-section the appropriate temperature is</p> $T_{kr} = T_1 \cdot \frac{2}{\gamma + 1}$ $T_{kr} = 406,7 \cdot \frac{2}{1,3 + 1}$ $T_{kr} = 353,6 \text{ K}$ <p>At this temperature the viscosity can be taken from tables e.g. Properties of Water and Steam in SI-Units, Springer 1969).</p> $\eta = 1,19 \cdot 10^{-5} \text{ kg/(s}\cdot\text{m)}$	<p>Il faut, à cet effet, procéder de façon itérative parce que, d'une part, le coefficient de perte de la tuyère est fonction du nombre de Reynolds obtenu dans la section de la tuyère et que, d'autre part, ce nombre de Reynolds lui-même dépend du débit massique à déterminer. Ce nombre de Reynolds calculé dans la première étape ne peut cependant pas différer de plus de 10 % du chiffre correct. Il en résulte, pour deux étapes d'itération, dans les calculs de la perte, une erreur éventuelle de 0,5 % maxi.</p> <p>Pour déterminer une première valeur approchée du nombre de Reynolds "Re", on calcule le débit sur la base de la valeur estimée.</p> $C = 1$ $W_s = 892.6 \cdot C \cdot D_n^2 \cdot \sqrt{\frac{P_1}{V_1}}$ $W_s = 892.6 \cdot 1.0 \cdot 0.1^2 \cdot \sqrt{\frac{43.5}{9.7}}$ $W_s = 18.9 \text{ lb/h}$ <p>La viscosité dynamique est fonction de la température. Comme la condition de pression critique règne jusqu'à la section au col de la tuyère, la température correspondante se calcule avec</p> <p>Cette température permet d'établir la viscosité à l'aide de tableaux (par ex. Properties of Water and Steam in SI-Units, Springer 1969).</p> $\mu_{kr} = 8.0 \cdot 10^{-6} \text{ lb/(ft}\cdot\text{s)}$
--	--	---	---

	<p>Die Reynoldszahl wird dann:</p> <p>The Reynolds number is then:</p> <p>Le nombre de Reynolds est alors de:</p>	$Re = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\dot{m}}{d \cdot \eta}$ $Re = \frac{4 \cdot 2,38 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 2,54 \cdot 10^{-3} \cdot 1,19 \cdot 10^{-5}}$ $Re = 1,00 \cdot 10^5$	$Re = \frac{W_s}{236 \cdot \mu_{kr} \cdot D_n}$ $Re = \frac{18,9}{236 \cdot 8,0 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1}$ $Re = 1,00 \cdot 10^5$
<p>2. Iterations-schritt</p> <p>2nd Iteration step</p> <p>2^e étape d'itération</p>	<p>Zu $Re = 10^5$ gehört ein Düsenverlustfaktor</p> <p>At $Re = 10^5$ the nozzle coefficient is</p> <p>A "Re" = 10^5 correspond un facteur de perte de tuyère de</p>	<p>$a = 0,979$, d.h. $a \cdot \psi_{kr} = 0,462$ i.e. c'est-à-d.</p>	<p>$C = 0,904$</p>
	<p>Der Massenstrom ist dann:</p> <p>The mass flow is then:</p> <p>Le débit massique est alors de:</p>	$\dot{m} = a \cdot \psi_{kr} \cdot f \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{P_1}{V_1}}$ $\dot{m} = 0,462 \cdot 5,07 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{3 \cdot 10^5}{0,6056}}$ $= 2,33 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$	$W_s = 892,6 \cdot C \cdot D_n^2 \cdot \sqrt{\frac{P_1}{V_1}}$ $W_s = 892,6 \cdot 0,904 \cdot 0,1^2 \cdot \sqrt{\frac{43,5}{9,7}}$ $W_s = 17,1 \text{ lb/h}$
<p>Ergebnis</p> <p>result</p> <p>Résultat</p>	<p>Das Verhältnis der Reynoldszahlen aus beiden Iterationsschritten entspricht dem Massenstromverhältnis.</p> <p>The ratio of the Reynolds numbers of both iteration steps corresponds to the mass flow ratio.</p> <p>Le rapport des nombres de Reynolds résultant des deux étapes d'itération correspond au rapport des débits massiques.</p>	$\frac{Re_2}{Re_1} = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1}$ $\frac{Re_2}{Re_1} = \frac{2,33 \cdot 10^{-3}}{2,38 \cdot 10^{-3}}$ $\frac{Re_2}{Re_1} = 0,98$	$\frac{Re_2}{Re_1} = \frac{W_{s2}}{W_{s1}}$ $\frac{Re_2}{Re_1} = \frac{17,1}{18,9}$ $\frac{Re_2}{Re_1} = 0,905$

Im zweiten Iterationsschritt wurde mit der Reynoldszahl des ersten gerechnet. Wie die Prüfung zeigt, ist die Abweichung von der tatsächlichen Reynoldszahl kleiner als 10 %. Ein dritter Iterationsschritt würde daher praktisch keine Veränderung mehr bringen. Somit ist das Ergebnis:

The estimated Reynolds number from the first step is used in the second step. As can be seen, the variation from the actual Reynolds number is less than 10 %. A third iteration would have negligible effect.

The result is thus:

Pour la deuxième étape d'itération, on a calculé avec le nombre de Reynolds de la première étape. Comme le montre la vérification, l'écart du nombre de Reynolds réel est inférieur à 10 %. Une troisième étape d'itération ne changerait pratiquement rien.

Le résultat est donc:

$$\dot{m} = 2,33 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$$

$$W_s = 17.1 \text{ lb/h}$$

PNEUROP MEMBERS

- B Belgium - FABRIMETAL** Mr Guy Van Doorslaer
Federation des Entreprises de l'Industrie des Fabrications Metalliques
21 Rue des Drapiers, B-1050 BRUSSELS
Tel: 00 32 2 510 2311 Fax: 00 32 2 510 2301
- CH/FL Switzerland and Liechtenstein - VSM** Mr H P Finger
Verein Schweizerischer Maschinen-Industrieller
Kirchenweg 4, CH-8032 ZÜRICH, Switzerland
Tel: 00 41 1 384 48 44 Fax: 00 41 1 384 48 49
- D Germany - VDMA** Herr Josef Hüggelmeier
Verband Deutscher Maschinen und Anlagenbau EV
Fachgemeinschaft Kompressoren und Vakuumpumpen
Postfach 71 08 64, Niederrad, Lyoner Straße 18, D-60528 FRANKFURT AM MAIN
Tel: 00 49 69 6603-1281 Fax: 00 49 69 6603-1690
- Fachgemeinschaft Bergbaumaschinen Herr Manfred Schmidt
Postfach 71 08 64, Niederrad, Lyoner Straße 18, D-60498 FRANKFURT AM MAIN
Tel: 00 49 69 6603-680 Fax: 00 49 69 6603-812
- F France - SIO and SCC** M. L-N Jacob (SIO) and M. J-P Corbet (SCC)
Syndicat de l'Industrie de l'Outillage
Syndicat des Constructeurs de Compresseurs
Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc, 92400 Courbevoie
Cedex 72 92038 PARIS LA DEFENSE
Tel: 00 33 1 47 17 64 59 Fax: 00 33 1 47 17 64 55
- GB Great Britain - BCAS and PNEUROP Secretariat** Mr R D Wall
British Compressed Air Society
33/34 Devonshire Street, LONDON WIN 1RF
Tel: 00 44 (0)171 935 2464 Fax: 00 44 (0)171 935 3077
- I Italy - ANIMA** Signora Loredana Nicola
Federazione delle Associazioni Nazionali dell'Industria Meccanica Varia ed Affine
Via Luisa Battistotti Sassi 11/b, 20133 MILANO
Tel: 00 39 2 73971 Fax: 00 39 2 739 7316
- NL The Netherlands - FME and GFC** Mr Timo Corporaal
Vereniging voor de Metaal - en de Elektrotechnische Industrie
Groep Fabrikanten van Compressoren
Postbus 190, Boerhaavelaan 40, NL-2700 AD ZOETERMEER
Tel: 00 31 79 531 100 Fax: 00 31 79 531 365
- S Sweden - TLG** Mr Tommy Lind
Tryckluftsgruppen inom Sveriges Verkstadsindustrier
Box 5510, Storgatan 5, S-114 85 STOCKHOLM
Tel: 00 46 8 782 0800 Fax: 00 46 8 660 3378
- SF Finland** Mr Jyrki Mäkiö
Federation of Finnish Metal and Engineering Industries
c/o Mr Jyrki Mäkiö
Tamrotor Ltd, PO Box 516, 33101 TAMPERE
Tel: 00 358 31 249 3854 Fax: 00 358 31 249 3900