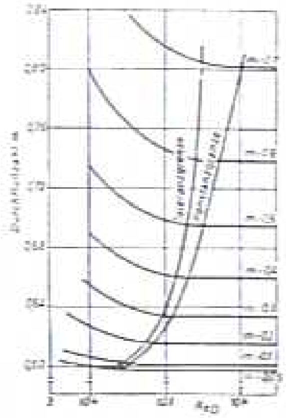
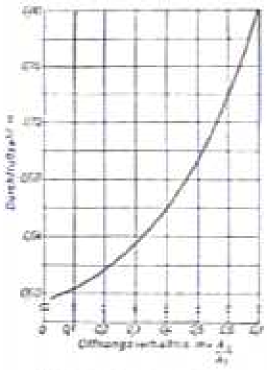
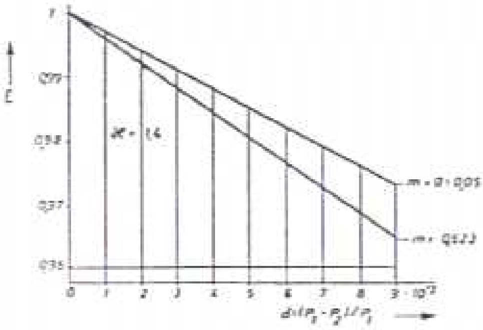
VEEL GEBRUIKTE FORMULES



1: Durchflußzahl von Blenden in Abhängigkeit von der Re-Zahl [2 6]



2: Durchflußzahl von Blenden für Re-Zahlen oberhalb der Konstantengrenze ($Re > 2 \cdot 10^5$) [2 6]



3: Expansionszahl ε der Luft für Blenden

b) *doorstroming door een straalpijp (Düse) met groter drukverschil.*

Dit komt voor bij het uitstromen van perslucht uit een reservoir. Daarbij verkrijgt men voor de massastroming:

$$m = \psi . A_2 . \sqrt{2 . \frac{p_1}{v_1}}$$

met $v = \frac{T_1 . R}{p_1}$ wordt dit

$$\frac{dm}{dt} = \psi . A_2 . p_1 \sqrt{\frac{2}{R.T}}$$

of voor debiet $Q = \psi . A_2 . \frac{p_1}{\rho} . \sqrt{\frac{2}{R.T}}$

daarin is ψ de uitstroomfunctie.

$$\psi = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa - 1}\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}\right]}$$

ψ is derhalve alleen afhankelijk van de drukverhouding p_2/p_1 die zijn maximum van 0,53 heeft bij de kritische drukverhouding.

FORMULES IN DE PNEUMATIEK

Vele berekeningen in de pneumatiek zijn in vergelijking met de hydraulica, moeilijker, omdat bij het medium perslucht naast de temperatuur ook de vochtigheid en de luchtdruk moeten beschouwd worden.
Daarom worden vele gegevens voor een "normaalatmosfeer" gemaakt, dit is voor 0°C en 1013 mbar druk (vroeger 760 cm Hg -kwik). De densiteit daarbij bedraagt 1,293 kg/m³. Daarnaast bestaat ook nog een referentietemperatuur van 15°C bij 1013 mbar druk en een densiteit van 1,225 kg/m³.
Daar komt nog bij dat de sterke samendrukbaarheid van lucht een onderscheid vereist tussen aanzuigvolume en persluchtvolume.

§1 Fysische Beginselen.

*1.1 Densiteitverandering van lucht met de hoogte:

$$\rho = \rho_0 (1 - 0{,}0226 . h)^{4.26}$$

Densiteitverandering door druk en temperatuur (tabel 1)

Isobaar	n = 0	$p.v^0$ = constant
Isotherm	n = 1	$p.v^1$
Adiabatisch	n = χ	$p.v^{\chi}$
Isochoor	n = ∞	$p.v^{\infty}$

Tabel 1: Exponenten bij de verschillende toestandsveranderingen

Absolute vochtigheid van lucht

$$f = \frac{m_D}{V}$$

met m_D watermassa
en V volume vochtige lucht

De relatieve vochtigheid wordt betrokken uit de op dat ogenblik verzadigingstoestand

$$\varphi = \frac{m_D}{m_s} = \frac{\rho_D}{\rho_s}$$

met ρ_D en m_D groottes bij de bijhorende vochtigheidsgehalte en m_s en ρ_s bij verzadiging.

Daarbij wordt het heersende watergehalte

$$m_w = \varphi . m_s \quad E = n.p_{abs}$$

en de per m³ ontstane condenswaterhoeveelheid wordt:

$$w = \varphi . \rho_D - \rho_s . \frac{p_1}{p_2} . \frac{T_2}{T_1} (kg/m^3)$$

daarin is $\varphi . \rho_D$ de aangezogen waterhoeveelheid terwijl

$\rho_s . \frac{p_1}{p_2} . \frac{T_2}{T_1}$ de hoeveelheid water is in verzadigingstoestand bij druk p_2 en temperatuur T_2.

*1.2 Eigenschappen van het medium perslucht.

De dynamische en kinematische viscositeit van lucht kunnen uit tabel 2 afgelezen worden.
De elasticiteitsmodulus van lucht is

$$p_1 . v_1 = p_2 . v_2 = \text{constant} = R.T \quad E_L = n.p_{abs} \quad \text{met}$$

n = polytropenexponent 1,3

Dat betekent dat de E-modulus van lucht alleen afhankelijk is van exponent n en de druk van deze lucht. Daarmee wordt de stijfheid van de luchtzuil

$$C = \frac{A^2}{V_0}.n.p_{abs} = \frac{A}{V}.n.p_{abs}$$

Daarmee wordt $\psi_{max} = 0,484$

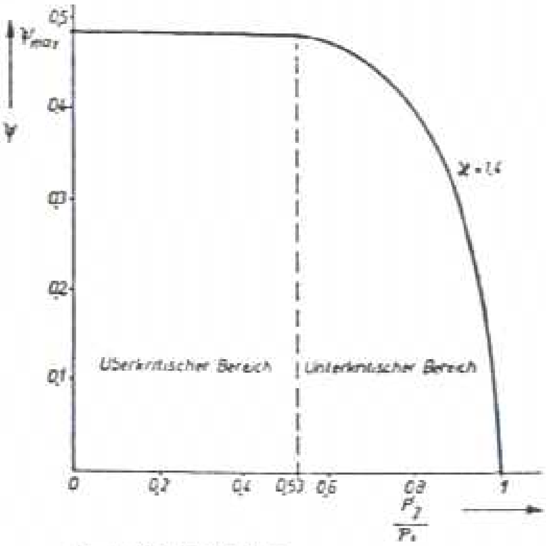
Dit betekent dat ψ in het onderkritische bereik paraboolvormig verloopt, terwijl het in overkritisch bereik constant of ψ_{max} blijft (figuur 4)

c) *doorstroming door diafragma met groter drukverschil.*

Hier moet nog de straalinsnoering beschouwd worden.

$$Q = \alpha\psi.A_2.\frac{p_1}{\rho}.\sqrt{\frac{2}{R.T}}$$

daarbij is $\alpha.\psi$ afhankelijk van p_2/p_1; A_2/A_0 en A_0/A_1.



4: Ausflußfunktion

Temperatuur in °C								
Druk	0		20		50		100	
Bar	$\eta.10^6$	$\nu.10^6$	$\eta.10^6$	$\nu.10^6$	$\eta.10^6$	$\nu.10^6$	$\eta.10^6$	$\nu.10^6$
1	17,54	13,75	18,55	15,60	19,99	18,54	22,24	23,84
1,0133	17,54	13,30	18,55	15,11	19,99	17,95	22,24	23,06
20	18,05	0,700	18,93	0,791	20,37	0,943	22,54	1,210
40	18,60	0,358	19,42	0,404	20,77	0,481	22,85	0,615
60	19,20	0,2445	20,02	0,277	21,18	0,327	23,18	0,419
80	19,83	0,1888	20,60	0,214	21,65	0,252	23,52	0,320
100	20,5	0,1559	21,10	0,1757	22,10	0,2065	23,90	0,262
150	22,2	0,1140	22,60	0,1272	23,50	0,1485	24,90	0,1843
200	24,1	0,0949	24,30	0,1050	24,90	0,1213	26,10	0,1491
250	26,2	0,0863	26,1	0,0936	26,40	0,1064	27,30	0,1288
300	28,3	0,0808	27,9	0,0864	28,00	0,0969	28,60	0,1156

Tabel: Dynamische viscositeit η in Ns/m² en kinematische viscositeit ν in m²/s van lucht, in functie van druk en temperatuur.

§3 Thermodynamica

*3.1.Toestandsgrootheden.

De toestand van een gas wordt door de betrekkingen tussen de grootte, druk p, specifiek volume v= V/G en temperatuur T beschreven. Daarvoor dient de *Wet van Boyle-Marriotte:*

Blijft de temperatuur constant,
dan blijft ook p.v constant

$$p_1.v_1 = p_2.v_2 \quad \text{of}$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1} = \text{Constant}$$

en ook de *Wet van Gay-Lussac:*

Blijft de druk constant, dan is de verhouding van een gasvolume voor een na de verwarming gelijk aan de temperatuursverhouding:

$$\frac{v}{v_0} = \frac{T}{T_0} \quad \text{of} \quad v = v_0.\frac{T}{T_0}$$

Beide wetten zijn op zichzelf weinig praktisch. De combinatie echter geeft de zogenaamde gasconstante *R*

$$\frac{p_1.v_1}{T_1} = \frac{p_2.v_2}{T_2} = R = 286,9\ \text{J/kg.K}$$

Daardoor wordt de thermische toestandsvergelijking:

p.v = R.T of met *v=V/G* *p.V=G.R.T*

Bij hogere drukken geldt lucht niet meer als een ideaal gas. de afwijking wordt gekenmerkt door factor k waardoor *p.v=k.R.T.*

VEEL GEBRUIKTE FORMULES

*3.2 Toestandsveranderingen.

3.2.1 Polytrope toestandsverandering

Ze stelt de algemene uitdrukking van de toestandsverandering voor. Men kan alle andere toestandsveranderingen als bijzondere gevallen stellen (tabel 3)

Bij polytrope toestandsveranderingen geldt

$$p_1.v_1^{n} = p_2.v_2^{n} = constant$$

of $$\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{n}} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{n-1}} \quad \text{en ook} \quad \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{n-1}{n}}$$

Over het algemeen wordt exponent n gelijkgesteld aan 1,3. n ligt hier tussen 1 en 1,4 naargelang het proces dichter bij een isotherme dan wel bij een adiabatisch verloop ligt.

Bij polytrope uitzetting is de afgegeven arbeid

$$W_{exp} = \frac{R}{n-1}.(T_1 - T_2) \qquad \text{waarbij}$$

men voor de polytrope compressie een arbeid van $p_2 > b.p_1$ opbrengen moet.

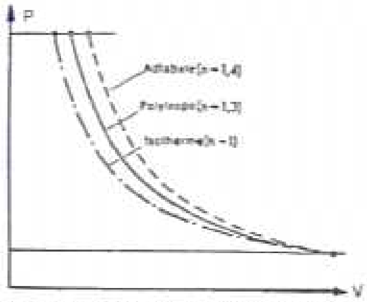
3.2.2. Isotherme toestandsverandering.

Hier wordt het gas bij constante temperatuur verdicht respectievelijk ontspannen

$$p_1.v_1 = p_2.v_2 = \text{constant} = R.T$$

Bij isotherme toestandsveranderingen is de arbeid nodig voor het verdichten dezelfde als die bij het ontspannen afgegeven arbeid (figuur 5)

$$W = p_1.v_1.\ln\frac{p_1}{p_2}$$



5: Schematisches Druck-Volumendiagramm

3.2.3. Adiabatische toestandsverandering.

Deze geldt wanneer bij verdichting of ontspannen, warmte wordt toegevoerd noch afgevoerd.
Daarbij wordt

$$p_1.v_1^{\kappa} = p_2.v^{\kappa} = \text{constant}$$

of $$\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{\kappa}} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}}$$

De afgegeven arbeid bij ontspannen is

$$W_{exp} = \frac{1}{\kappa-1}(p_1.v_1 - p_2.v_2)$$

of $$W_{exp} = \frac{(p_1.v_1)}{\kappa-1}\left[1-\left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa-1}\right]$$

Bij adiabatisch verdichten wordt de benodigde arbeid:

$$W_{verd} = \kappa.W_{exp}$$

Tabel 3:Luchtdichtheid ρ in kg/m³ in relatie tot druk en temperatuur

Druk in bar	Temperatuur in °C							
	0	20	50	100	150	200	300	400
1	1,2514	1,066	1,067	0,915	0,807	0,722	0,596	0,507
1,033	1,2930	1,204	1,092	0,9458	0,8343	0,7457	0,6157	0,5242
20	25,28	23,46	21,19	18,26	16,08	14,35	11,83	10,07
40	50,98	47,14	42,39	36,38	31,97	28,51	23,49	20,02
60	77,01	70,84	63,47	54,29	47,61	42,45	34,97	29,80
80	103,0	94,54	83,34	72,03	63,05	56,15	46,26	39,43
100	128,9	118,0	105,0	89,45	78,22	69,60	57,33	48,90
150	191,2	174,5	154,9	132,5	114,9	102,3	84,18	71,87
200	248,8	226,9	201,5	171,2	149,6	133,3	109,8	93,88
250	297,8	273,4	243,7	207,9	182,0	162,4	134,1	114,9
300	342,9	316,5	283,3	242,5	218,8	190,2	157,3	135,0

Combineert men daarbij de betrekking voor de gasconstante, dan kan men de eindtemperatuur van een adiabatische verdichting bepalen.

$$T_1.v_1^{\kappa-1} = T_2.v_2^{\kappa-1} = \text{Constant}$$

of $$T_2 = T_1.\left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa-1}$$

3.2.4. Isobare toestandsverandering.

Ze omvat de volumeverandering van een gas wanneer bij constante druk warmte wordt toegevoerd:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}$$ daarbij kan een arbeid van

$$W = p.(v_2 - v_1)$$ afgegeven worden.

Dezelfde arbeid wordt opgenomen wanneer het gasvolume, bij afkoeling, kleiner wordt.

3.2.5. Isochore toestandsvergelijking

Wordt het gas bij constant specifiek volume verwarmd dan stijgt de druk met de verhouding

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

§4 Vermogenverliezen.

Ook in pneumatiek bestaan de vermogenverliezen uit druk verliezen en lekverliezen.
- Drukverlies door wrijving:

$$\Delta p_1 = \sum \lambda.\frac{l}{d}.\frac{\rho}{2}.w^2$$

- Stromingsverliezen:

$$\Delta p_2 = \sum \xi.\frac{\rho}{2}.w^2$$

- Schokverliezen bij buisverbreding

$$\Delta p_3 = \sum \frac{\rho}{2}.(w_1 - w_2)^2$$ met w_1 snelheid

in smalle buis en w_2 snelheid in bredere buis.
Daarmee wordt het drukafhankelijk rendement

$$\eta_p = \frac{p_0 - \sum \Delta p}{p_0} = p_0\left(1 - \sum \Delta p\right)$$

met p_0 = druk in het reservoir.

Het volumetrisch rendement wordt, zoals in de hydraulica, gesteld als

$$\eta_v = \frac{Q_{th}}{Q_{eff}}$$ met Q_{th} theoretisch luchtverbruik

en $Q_{eff} = Q_{th} + Q_L$ luchtverbruik met verliezen.

§5 Bepaling van doorstroming door componenten.

De geleidbaarheid C van een component is de maat van het doorstromingsvermogen door deze component en daarmee de verhouding van het debiet Q tot de ingangsdruk bij een overkritische stroming en een luchttemperatuur van 20 C.

$$C = \frac{Q}{p_1}$$ met Q in l/s en p_1 in bar

Een overkritische stroming doet zich voor wanneer de ingangsdruk p_1 in verhouding met de uitgangsdruk zo groot is dat het debiet proportioneel is met de ingangsdruk en onafhankelijk van de uitgangsdruk. Deze toestand wordt bereikt wanneer de luchtsnelheid in welk punt dan ook van het apparaat de snelheid van het geluid evenaart.

De kritische drukverhouding b is de verhouding p_2/p_1 waarbij de overkritische stroming bereikt wordt. Het geeft uitsluitsel omtrent de doorstromingsverhoudingen in de klep. De b-waarden voor kleppen schommelen tussen 0,25 en 0,45 (Lucifer). Daarbij geldt de grootste waarde voor de vrije doorstroming.

Met de waarden C en b kan het stromingsvermogen van een toestel over het ganse drukbereik gedefinieerd worden.

<u>Stromingsvergelijking.</u>

Voor overkritische doorstroming geldt ($p_2 \leq b.p_1$)

$$\omega = \sqrt{1 - \left(\frac{p_2/p_1 - b}{1-b}\right)^2}$$

met C in l/s en p_1 in bar
K_1 correctiefactor voor temperatuur =

$$K_1 = \sqrt{\frac{273}{273 + Temp}}$$

Voor onderkritische doorstroming ($p_2 > b.p_1$) geldt

$$Q = C.p_1.K_1.\omega$$

met $$\omega = \sqrt{1 - \left(\frac{r-b}{1-b}\right)^2}$$

voor $p_2/p_1 = r$
p_2 is de uitgangsdruk

De drukval volgt uit

$$\Delta p = (1-b)\left[p_1 \cdot \sqrt{p_1^{2} - \left(\frac{Q}{C.K_1}\right)^2}\right]$$

en als betrekking tussen drukval en drukverhouding

$$\frac{\Delta p}{p_1} = 1 - \frac{p_2}{p_1} = 1 - r$$

Voor het nomogram in figuur 7 liggen de bovengenoemde vergelijkingen voor Q aan de basis, waarbij, voor de overkritische stroming $\omega = 1$ wordt

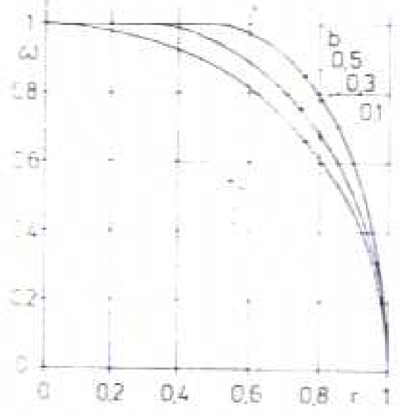
Zijn de C en b-waarden voor de na elkaar geschakelde elementen van een besturing bekend dan kan men de C-waarde van de gehele besturing bekomen uit

$$b_{tot} = 1 - C_{tot}^{2}.\left(\frac{1-b_1}{C_1^2} + \frac{1-b_2}{C_2^2} + .. + \frac{1-b_n}{C_n^2}\right)$$

Voor de b-waarden van de gehele besturing geldt

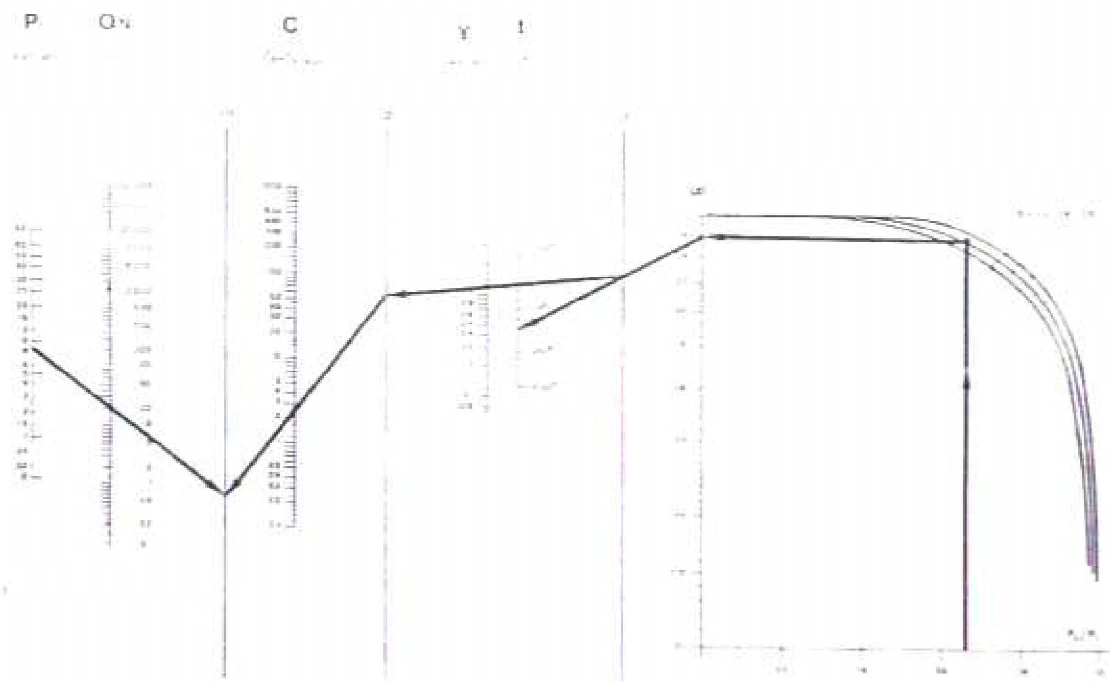
$$b_{tot} = 1 - C_{tot}^{2}.\left(\frac{1-b_1}{C_1^2} + \frac{1-b_2}{C_2^2} + .. + \frac{1-b_n}{C_n^2}\right)$$

VEEL GEBRUIKTE FORMULES



Figuur 6 toont drie krommen voor de waarden van de kritische drukverhouding b. Daarin is

b = 0,5 voor verliesvrije stroming
b = 0,3 voor enkelelementen met normale doorstromingsweerstand
b = 0,1 voor sturingen met meerdere elementen



Figuur 7: Nomogram voor het berekenen van debieten (Lucifer)

FORMULES IN DE PERSLUCHT

Referentiewaarden voor de opgave van compressorcapaciteiten (ISO 1217)

Absolute druk : 1 bar
Vochtgehalte : 0%
Temperatuur : 293,15 K
Koelmiddeltemperatuur : 293,15 K

Omrekening m³ naar Nm³(Normaal m³) en vice versa

Nm³ is bepaald bij : Absolute druk : 1,013 bar
Vochtgehalte : 0%
Temperatuur : 273,15 K

$$Nm^3 = m^3 \cdot \frac{273}{273+t_1} \cdot \frac{p_1 - p_x}{1{,}013}$$

$$m^3 = Nm^3 \cdot \frac{273+t_1}{273} \cdot \frac{1{,}013}{p_1 - p_x}$$

met: t_1 = temperatuur van de perslucht in °C
p_1 = druk van de perslucht in bara(absolute druk)
p_x = p_s x RV
p_s = dampspanning van water in verzadigde perslucht bij de temperatuur t_1 (bar = mbar/1000 uit tabellen)
RV = relatieve vochtigheid in absolute waarde (geen %)

Voorbeeld :

12m³/min bij 20 °C 60% RV 1 bara

12m³/min = 12 . 273/(273 + 20) . (1 - px)/1,013 Nm³/min
p_x = p_s . 0,60
p_s = 23,37mbar (cfr tabel) = 0,02337bar
p_x = 0,02337 . 0,60 = 0,014

12m³/min = 12 . 273/293 . (1- 0,014)/1,013 Nm³/min
= 12 . 273/293 . 0,986/1,013 Nm³/min
= 10,88 Nm³/min