

Het gecontroleerd pneumatisch versnellen en vertragen van een massa

Citation for published version (APA):

Derix, M. K. H. G. (1990). *Het gecontroleerd pneumatisch versnellen en vertragen van een massa*. (TH Eindhoven. Afd. Werktuigbouwkunde, Vakgroep Produktietechnologie : WPB; Vol. WPA0904). Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1990

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

**Het gecontroleerd pneumatisch
versnellen en vertragen van
een massa**

M.K.H.G. Derix

rapport nr. WPA 0904

Onderzoeksopdrachtverslag

Afstudeerhoogleraar : Prof. ir. J.M. van Bragt

Begeleider : ing. H.A. Bulten

**Technische Universiteit Eindhoven, Faculteit der
Werktuigbouwkunde, vakgroep WPA.**

Eindhoven, juni 1990.

SAMENVATTING:

Bij de beweging van persluchtcilinders treedt aan het einde van de slag vaak een stoot op. De bij deze stoot optredende versnellingspieken, kunnen bij verschillende toepassingen voor problemen zorgen, doordat de constructie of de te bewegen voorwerpen deze versnellingen niet aankunnen. Dit probleem speelt een grotere rol naarmate de bewegingssnelheden van de zuiger groter worden.

In dit rapport wordt een systeem beschreven dat met behulp van een extra reservoir aan de uitgangszijde van de cilinder, de sprong in de snelheid op het einde van slag voorkomt. Aan de hand van deze systeembeschrijving is een computerprogramma geschreven dat de beweging van de persluchtcilinder simuleert.

Met behulp van dit simulatieprogramma is het mogelijk de instelling van de smoorventielen en de grootte van het reservoir te bepalen bij een bepaalde belasting, opdat er geen sprong in de snelheid en dus geen versnellingspiek optreedt. Voorwaarde hiervoor is echter wel, dat de waarden van de variabelen die voor de systeembeschrijving nodig zijn, nauwkeurig bepaald moeten worden.

Het is dus nu mogelijk de persluchtcilinder als aandrijving in te zetten op plaatsen waar dat voorheen niet mogelijk was omdat de optredende hoge versnellingspiek niet acceptabel was. Dit kan een enorme kostenbesparing betekenen omdat de persluchtcilinder met de bijbehorende uitrusting goedkoop is ten opzichte van elektrische en hydraulische aandrijvingen.

SYMBOLENLIJST

a	versnelling	m/s^2
A_1	oppervlak zuiger inlaatzijde	m^2
A_u	oppervlak zuiger uitlaatzijde	m^2
A_{21}	oppervlak uitgang klep 1	m^2
A_{21}	oppervlak uitgang klep 1	m^2
A_{22}	oppervlak	m^2
b	dempingsconstante	$N.s/m$
b_1	kritische drukverhouding inlaatzijde	-
b_r	kritische drukverhouding reservoir	-
b_u	kritische drukverhouding uitlaatzijde	-
C_i	conductantie inlaatzijde cilinder	$m^5/N.s$
C_p	specifieke warmtecapaciteit bij const. druk	$N.m/Kg.K$
C_r	conductantie uitlaatzijde reservoir	$m^5/N.s$
C_s	conductantie seriegeschakelde elementen	$m^5/N.s$
C_u	conductantie uitlaatzijde cilinder	$m^5/N.s$
C_v	specifieke warmtecapaciteit bij const. temp.	$N.m/Kg.K$
$F_{b=1}$	belastingskracht	N
F_w	wrijvingskracht	N
h_1	specifieke enthalpie voedingslucht	J/Kg
L	slaglengte cilinder	m
M	massa van te bewegen delen	Kg
m_1	massa v.d. lucht ingangzijde cilinder	Kg
m_r	massa v.d. lucht in het reservoir	Kg
m_u	massa v.d. lucht uitgangzijde cilinder	Kg
NN	aantal integratiestappen	-
N1	polytropische exponent inlaatzijde	-
N2	polytropische exponent uitlaatzijde	-
N3	polytropische exponent reservoir	-
P_i	druk aan inlaatzijde cilinder	N/m^2
P_{i0}	druk inlaatz. cilinder op $t=0$	N/m^2
P_o	omgevingsdruk	N/m^2
P_r	druk in reservoir	N/m^2

Pr0	druk in reservoir op t=0	N/m ²
Pu	druk aan uitlaatzijde cilinder	N/m ²
Pu0	druk uitlaatz. cilinder op t=0	N/m ²
Pv	voedingsdruk	N/m ²
Qi	warmtestroom van inlaatzijde naar omgeving	J
Qr	warmtestroom van reservoir naar omgeving	J
Qu	warmtestroom van uitlaatzijde naar omgeving	J
R	gasconstante	N.m/Kg.K
t	tijd	s
Ti	temperatuur aan de inlaatzijde cilinder	K
Ti0	temp. aan de inlaatz. cilinder op t=0	K
Tr	temperatuur in het reservoir	K
Tr0	temp. in het reservoir op t=0	K
TT	tijdinterval waarover geïntegreerd wordt	s
Tu	temperatuur aan de uitlaatzijde cilinder	K
Tu0	temp aan de uitlaatz. cilinder op t=0	K
Tv	temperatuur voedingslucht	K
Ui	inwendige energie lucht inlaatzijde	J
v	snelheid	m/s
Vr	inhoud reservoir	m ³
Vvi	leidingvolume ingangszijde cilinder	m ³
Vvu	leidingvolume uitgangszijde cilinder	m ³
Wi	verrichte arbeid door lucht inlaatzijde	J
x	plaats van de zuiger	m
α	doorstroomcoëfficiënt	-
α_t	totale doorstroomcoëfficiënt	-
Δt	grootte van de tijdstap	s
α	exponent van Poisson	-

Opm.: De drukken zijn absolute drukken.

INHOUDSOPGAVE

SAMENVATTING	2
SYMBOLENLIJST	3
1. INLEIDING	7
2. SYSTEEMBESCHRIJVING	8
2.1. De bewegingsvergelijking	9
2.2. De drukverandering in de tijd	10
2.3. De massastroom	13
3. NUMERIEKE OPLOSSING	15
DIFFERENTIAALVERGELIJKING	
4. RESULTATEN	17
5. CONCLUSIE	20
LITERATUUR	21
BIJLAGEN	
Bijlage 1. Handleiding Pneusim	22
Bijlage 2. Het simulatieprogramma Pneusim in Turbo Pascal	26
Bijlage 3. Globale bepaling van de conductantie uit K_v en C_v	36
Bijlage 4. Het bepalen van de totale conductantie en kritische drukverhouding bij een serieschakeling van kleppen	37
Bijlage 5. Werkwijze voor het bepalen van de juiste componenten van het systeem	39

1. Inleiding

Luchtcilinders worden vaak als aandrijving in werktuigbouwkundige constructies gebruikt. Ze hebben een aantal voordelen die hun gebruik stimuleren:

- eenvoudige installatie;
- hoge bedrijfszekerheid;
- hoge snelheden tot 3 m/s;
- goedkoop in aanschaffing en onderhoud.

Ze hebben echter ook een aantal nadelen die hun inzetbaarheid begrenzen:

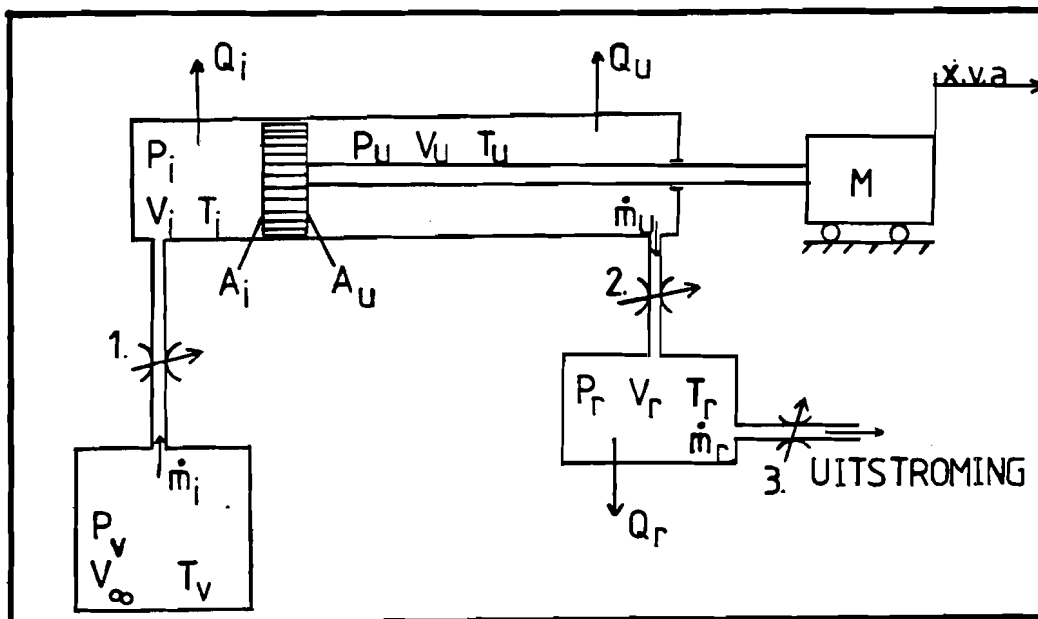
- geringe stijfheid van de luchtcilinder;
- gewijzigd bewegingsverloop bij verandering van belasting- en wrijvingskrachten;
- tussenposities zijn slecht beheersbaar;
- relatief hoge energiekosten;
- hoge geluidsproductie door de uitstroming van de lucht;
- hoge versnellingspiek aan het einde van de beweging.

Vooraf dit laatste punt, de versnellingspiek aan het einde van de beweging, die veroorzaakt wordt door de sprong in de snelheid, is van belang bij het verplaatsen van brosse en kwetsbare produkten. Tevens kan deze versnellingspiek de constructie momentaan overbelasten. Daarom wordt op dit punt nader ingegaan en wordt hier een systeem beschreven, dat deze versnellingspiek aan het einde van de beweging moet verhinderen.

2. Systeembeschrijving

Bij het hieronder beschreven systeem wordt gebruik gemaakt van een normale standaard luchtcilinder zonder bufferruimte. Het enige verschil met een standaard pneumatische aandrijving is, dat de uitstroming van de lucht verloopt via de smoorventielen 2 en 3, waartussen zich een reservoir bevindt (zie figuur 1).

Het systeem ziet er schematisch als volgt uit:



Figuur 1: Schematisch model systeem.

De voedingslucht stroomt via smoorventiel 1 in de ingangszijde van de luchtcilinder. Hierdoor stijgt de druk aan de ingangszijde waardoor de zuiger een positieve versnelling krijgt. De lucht aan de uitlaatzijde stroomt via smoorventiel 2 in het reservoir en vanuit het reservoir stroomt de lucht via smoorventiel 3 uit in de omgeving. Aan de in- en uitlaatzijde van de cilinder zijn ook schakelbare ventielen, leidingen en instelbare smoorventielen. Deze worden echter voor de eenvoud vervangen door één smoorventiel, aan respectievelijk de

in- en uitlaatzijde, met dezelfde eigenschappen als de combinatie van deze ventielen en leidingen.

Om de grootte van het reservoir te bepalen ,zodat er op het einde van de slag geen sprong in de snelheid en geen terugvering optreden, moet eerst het verloop van de snelheid bij een bepaalde instelling van het systeem bekend zijn. Aan de hand van het verloop van de snelheid in de tijd is te zien hoe we de inhoud van het reservoir en de instelling van smoorventiel 3 moeten veranderen, om aan de gestelde eisen te voldoen.

Om het verloop van de snelheid in de tijd te bepalen, wordt gebruik gemaakt van een computerprogramma dat de beweging van de zuiger simuleert. Om dit programma te schrijven, moet eerst de druk in de verschillende elementen van het systeem bekend zijn, om via een krachtenevenwicht op de zuiger de versnelling te bepalen.

2.1. De bewegingsvergelijking

Via een krachtenevenwicht van de op de zuiger werkende krachten, wordt de bewegingsvergelijking opgesteld. De belastingskracht $F_{b=1}$ is samengesteld uit een constante wrijvingskracht en een dempingskracht, die het gevolg is van de gesmeerde zuigerafdichting.

$$F_{b=1} = F_w + b \cdot v \quad (1)$$

$$a = \frac{P_i \cdot A_i - P_u \cdot A_u - P_o \cdot (A_i - A_u) - F_{b=1}}{M} \quad (2)$$

2.2. De drukverandering in de tijd

Bij de nu volgende thermodynamische vergelijkingen, die nodig zijn voor het bepalen van de drukken, wordt het volgende aangenomen:

- er treedt geen lek op;
- lucht is een ideaal gas, met constante C_p en C_v ;
- er vindt een ideale vermenging van de lucht plaats, met uniforme druk en temperatuur in de controleruimte;
- de potentiële energieterm wordt verwaarloosd;
- de kinetische energie van de lucht in de controleruimten wordt verwaarloosd.

Voor de ingangszijde van de cilinder kan nu de eerste hoofdwet van de thermodynamica toegepast worden.

$$h_1 \cdot dm_1 - dQ_i = dU_i + dW_i \quad (3)$$

$$h_1 = C_p \cdot T_v \quad (4)$$

$$U_i = C_v \cdot m_1 \cdot T_i \quad (5)$$

$$dW_i = P_i \cdot dV_i = P_i \cdot A_1 \cdot dx \quad (6)$$

Substitutie van (4), (5) en (6) in (3) geeft:

$$dT_i = \frac{C_p \cdot T_v \cdot dm_1 - C_v \cdot dm_1 \cdot T_i - P_i \cdot A_1 \cdot dx - dQ_i}{C_v \cdot m_1} \quad (7)$$

Voor de uitlaatzijde geldt analoog:

$$dT_u = \frac{C_v \cdot T_u \cdot dm_u - C_p \cdot dm_u \cdot T_u + P_u \cdot A_u \cdot dx - dQ_u}{C_v \cdot m_u} \quad (8)$$

Ook voor het reservoir kan de eerste hoofdwet van de thermodynamica toegepast worden:

$$C_p \cdot T_u \cdot dm_u - C_p \cdot T_r \cdot dm_r - dQ_r = C_v \cdot (dm_u - dm_r) \cdot T_r + C_v \cdot dT_r \cdot m_r \quad (9)$$

$$dT_r = \frac{C_p \cdot T_u \cdot dm_u - C_p \cdot T_r \cdot dm_r - dQ_r - C_v \cdot (dm_u - dm_r) \cdot T_r}{C_v \cdot m_r} \quad (10)$$

Partieel differentiëren van de ideale gaswet geeft voor de ingangszijde:

$$dP_i = (m_i \cdot R) / V_i \cdot (dT_i + T_i / m_i \cdot dm_i - (P_i \cdot dV_i) / (m_i \cdot R)) \quad (11)$$

Substitutie van (10) in (11) en verder uitwerken geeft:

$$dP_i = \alpha / V_i \cdot (R \cdot T_v \cdot dm_i - P_i \cdot A_i \cdot dx - (\alpha - 1) / \alpha \cdot dQ_i) \quad (12)$$

Analoog wordt voor de uitlaatzijde en het reservoir gevonden:

$$dP_u = \alpha / V_u \cdot (P_u \cdot A_u \cdot dx - R \cdot T_u \cdot dm_u - (\alpha - 1) / \alpha \cdot dQ_u) \quad (13)$$

$$dP_r = \alpha / V_r \cdot (R \cdot T_u \cdot dm_u - R \cdot T_r \cdot dm_r - (\alpha - 1) / \alpha \cdot dQ_r) \quad (14)$$

Nu moet nog de hoeveelheid warmte, die door het systeem aan de omgeving wordt afgegeven (dQ_i , dQ_r en dQ_u) bepaald worden.

Er kunnen twee gevallen onderscheiden worden.

- 1) Volledige warmteuitwisseling (dT_i , dT_u en dT_r zijn nul).
- 2) Geen warmteuitwisseling (dQ_i , dQ_u en dQ_r zijn nul).

ad 1) volledige warmteuitwisseling:

Substitutie van $dT_i=0$ in (7) geeft een uitdrukking voor dQ_i . Deze uitdrukking in (12) gesubstitueerd en delen door dt geeft de volgende vergelijking voor de inlaatzijde:

$$dP_i/dt = 1/V_i \cdot (R \cdot T_i \cdot dm_i/dt - P_i \cdot A_i \cdot v) \quad (15)$$

Voor de uitlaatzijde en het reservoir geldt eveneens:

$$dP_u/dt = 1/V_u \cdot (P_u \cdot A_u \cdot v - R \cdot T_u \cdot dm_u/dt) \quad (16)$$

$$dP_r/dt = 1/V_r \cdot (R \cdot T_r \cdot dm_u/dt - R \cdot T_r \cdot dm_r/dt) \quad (17)$$

ad 2) geen warmteuitwisseling:

Substitutie van $dQ_i=0$ in (7) geeft:

$$dP_i/dt = \alpha/V_i \cdot (R \cdot T_v \cdot dm_i/dt - P_i \cdot A_i \cdot v) \quad (18)$$

Voor de uitlaatzijde en het reservoir geldt analoog:

$$dP_u/dt = \alpha/V_u \cdot (P_u \cdot A_u \cdot v - R \cdot T_u \cdot dm_u/dt) \quad (19)$$

$$dP_r/dt = \alpha/V_r \cdot (R \cdot T_u \cdot dm_u/dt - R \cdot T_r \cdot dm_r/dt) \quad (20)$$

Omdat er bij normale bedrijfsomstandigheden van een persluchtcilinder altijd warmteuitwisseling met de omgeving plaatsvindt, zij het geen volledige, wordt de polytropische exponent N ingevoerd. Deze geeft de mate van warmteuitwisseling met de omgeving aan.

Voor de drukverandering in de tijd gelden dan de volgende benaderingen:

$$dP_i/dt = N_1/V_i \cdot (R \cdot (T_i + (N_1-1)/(\alpha-1) \cdot (T_v - T_i)) \cdot dm_1/dt - P_i \cdot A_1 \cdot v) \quad (21)$$

$$dP_u/dt = N_2/V_u \cdot (P_u \cdot A_u \cdot v - R \cdot T_u \cdot dm_u/dt) \quad (22)$$

$$dP_r/dt = N_3/V_r \cdot (R \cdot (T_r + (N_3-1)/(\alpha-1) \cdot (T_u - T_r)) \cdot dm_r/dt - R \cdot T_r \cdot dm_r) \quad (23)$$

Hierbij geldt dat:

$$1 \leq N_{1,2,3} \leq \alpha$$

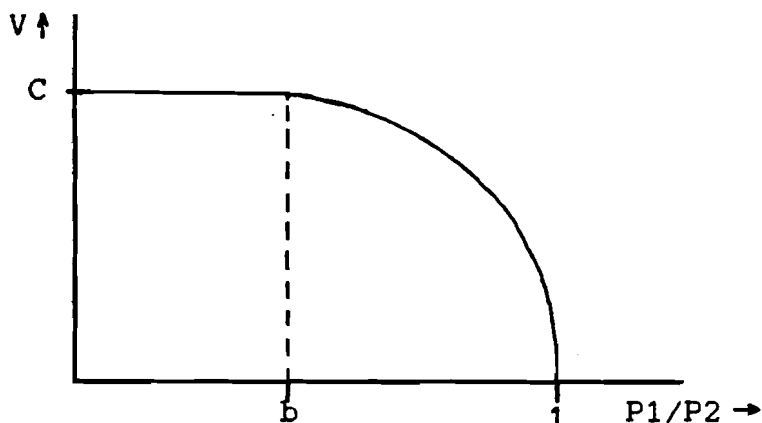
$N_{1,2,3} = 1$ bij volledige warmteuitwisseling

$N_{1,2,3} = \alpha$ bij geen warmteuitwisseling

2.3. De massastroom

In het verleden zijn er veel modellen ontwikkeld die de massastroom door een smoorventiel beschrijven. Deze hebben echter het nadeel dat ze te omslachtig zijn of de werkelijkheid niet nauwkeurig genoeg benaderen. Dit is voor een aantal fabrikanten uit de CETOP-organisatie aanleiding geweest een onderzoek aan dit onderwerp te laten uitvoeren. Het resultaat van dit onderzoek is een nauwkeurige en praktisch goed bruikbare benadering van de volumestroom, die is vastgelegd in de CETOP-aanbeveling RP 50 P. Volgens deze aanbeveling kan de volumestroom door een smoorventiel in het onderkritische gebied goed benaderd worden door een kwart ellips (zie figuur 2). Deze volumestroom wordt gemeten bij standaardcondities: $P_0 = 1,01325$ bar en $T = 293,15$ K. Met $R = 287$ J/kg K volgt dat $\rho = 1,2046$ kg/m³.

De stroming kan dan beschreven worden met twee variabelen:
 de conductantie C $[m^3/Ns]$;
 de kritische drukverhouding b $[-]$.
 Het verloop van de volumestroom als functie van de
 drukverhouding is in figuur 2 uitgezet.



Figuur 2: De volumestroom als functie v.d. drukverhouding

Voor de massastroom door de smoorventielen geldt dan:

$$dm_i/dt = \begin{cases} 1,2046 \cdot P_v \cdot C_i \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{P_i/P_v - b_i}{1 - b_i}\right)^2} & \text{als } P_i/P_v \geq b_i \\ 1,2046 \cdot P_v \cdot C_i & \text{als } P_i/P_v < b_i \end{cases}$$

$$dm_u/dt = \begin{cases} 1,2046 \cdot P_u \cdot C_u \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{P_r/P_u - b_u}{1 - b_u}\right)^2} & \text{als } P_r/P_u \geq b_u \\ 1,2046 \cdot P_u \cdot C_u & \text{als } P_r/P_u < b_u \end{cases}$$

$$dm_r/dt = \begin{cases} 1,2046 \cdot P_r \cdot C_r \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{P_o/P_r - b_r}{1 - b_r}\right)^2} & \text{als } P_o/P_r \geq b_r \\ 1,2046 \cdot P_r \cdot C_r & \text{als } P_o/P_r < b_r \end{cases}$$

3. Numerieke oplossing differentiaalvergelijking

Met behulp van de drukverandering in de tijd worden via een eerste orde Eulerbenadering de drukken in de verschillende elementen van het systeem bepaald. Deze eerste orde Eulerbenadering is niet de meest nauwkeurige, maar een betere benadering is vanwege de afhankelijkheid van het systeem niet mogelijk; voor het bepalen van de drukverandering moeten namelijk de temperatuur en massastroom bekend zijn en voor het bepalen van de temperatuur en de massastroom, moet de druk bekend zijn.

De temperatuur wordt met behulp van de ideale gaswet bepaald. Op $t=k\cdot\Delta t$ (met $k\in\mathbb{N}$) wordt met behulp van de gaswet de massa van de lucht in de elementen van het systeem bepaald. Op $t=(k+1)\cdot\Delta t$ wordt de massa van de lucht in de elementen opnieuw bepaald door de massastroom vermenigvuldigd met Δt bij de eerder berekende massa op te tellen. Met behulp van de gaswet wordt dan de temperatuur op $t=(k+1)\cdot\Delta t$ bepaald.

De temperatuur wordt niet met behulp van de formules (7), (8) en (10) bepaald in verband met de numerieke nauwkeurigheid. Bij de kleine massa van de lucht aan het begin en einde van de beweging aan resp. de in- en de uitlaatzijde van de cilinder, wordt de temperatuurverandering in de tijd te groot om met een Eulerbenadering nauwkeurige resultaten te bereiken.

De snelheid wordt aan de hand van de versnelling via een Eulerbenadering bepaald. Eveneens wordt de positie van de zuiger aan de hand van de snelheid via een Eulerbenadering bepaald.

Doordat er steeds van een eerste orde Eulerbenadering gebruik gemaakt wordt moet de integratiestap klein

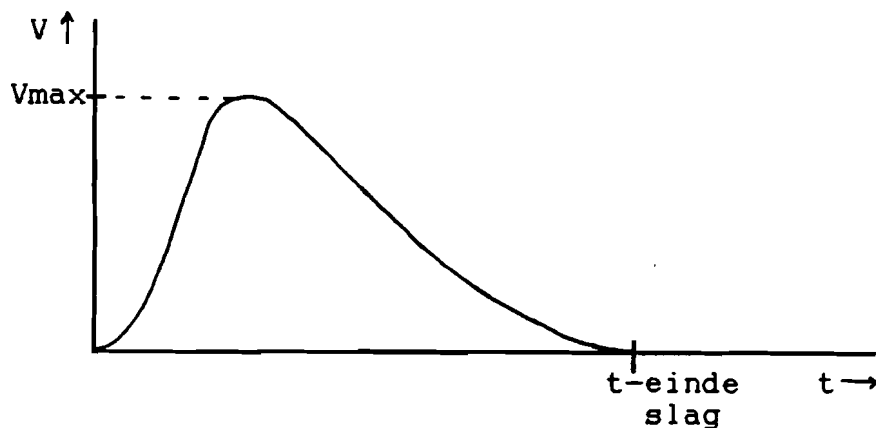
gekozen worden (± 4000 stappen per seconde) om een voldoende hoge nauwkeurigheid te bereiken.

4. Resultaten

Aan de hand van het simulatieprogramma, kunnen de grootte van het reservoir en de instelling van het smoorventiel van dit reservoir zodanig bepaald worden, dat aan de gestelde eisen voldaan wordt. Hiervoor moet eerst de grootte van alle ingangsvariabelen bepaald worden.

Om te bereiken dat er geen versnellingspiek op het einde van de slag optreedt en dat het verloop van de snelheid niet te zeer schommelt, moet bij het begin van de beweging de druk aan de uitgangszijde van de cilinder gelijk zijn aan de voedingsdruk en alle overige drukken in de cilinder gelijk zijn aan de omgevingsdruk.

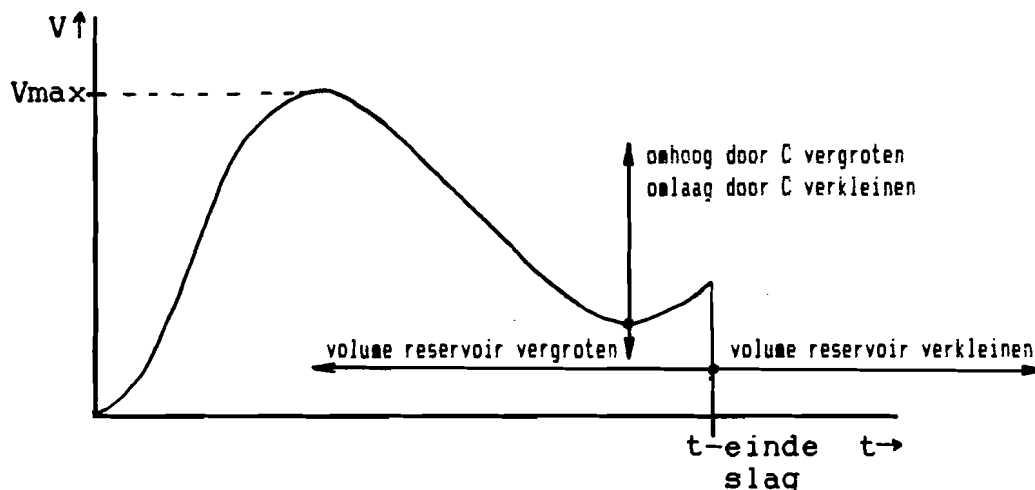
Met behulp van dit simulatieprogramma is het mogelijk de snelheid als functie van de tijd in een grafiek weer te geven. Het volgende verloop moet bereikt worden:



Figuur 3: Het gewenste verloop van de snelheid in de tijd

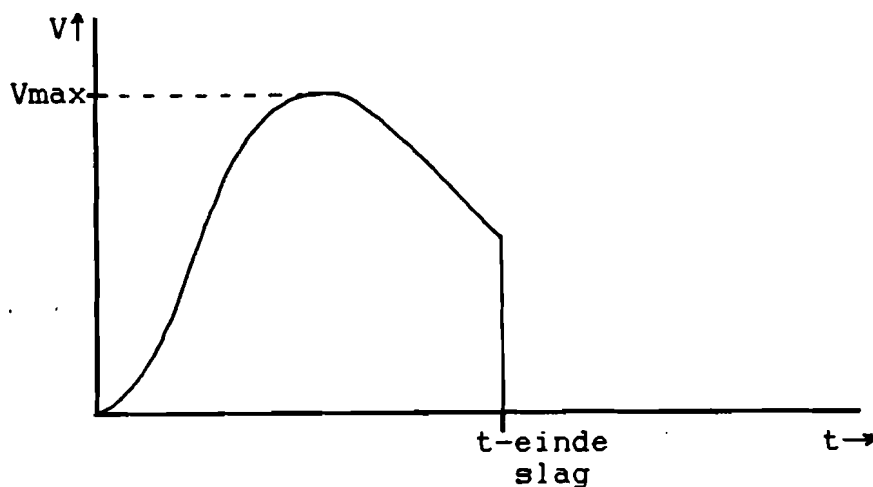
Het lokale minimum van de snelheid (zie figuur 4) moet dus gelijk aan nul worden en dat op het tijdstip waarop het einde van de slag wordt bereikt.

In figuur 4 staat hoe de snelheid globaal verloopt voor een bepaalde instelling van het systeem en hoe het verloop van de snelheid in de tijd beïnvloed kan worden.



Figuur 4: beïnvloeding van het lokale minimum

Indien het reservoir te groot is, ontstaat dus het volgende verloop:



Figuur 5: Verloop snelheid bij te groot reservoir

Het bepalen van de optimale instelling is dus een iteratief proces, dat naarmate de ervaring met het simulatieprogramma toeneemt, minder tijd in beslag neemt.

De snelste manier om de juiste configuratie van het systeem te bepalen, wordt bereikt door alle ingangsvariabelen als constant te beschouwen en alleen de grootte van het reservoir en de instelling van het smoorventiel van dit reservoir te veranderen.

Indien dan de grootte van het reservoir en de instelling van het smoorventiel van dit reservoir, zodanig geregeld is dat er geen stoot op het einde van de slag optreedt en de slagtijd te groot of te klein is, kunnen de volgende maatregelen genomen worden om de slagtijd te veranderen:

- de instelling van de smoorventielen aan de in- en de uitgang van de cilinder veranderen;
- de diameter van de cilinder veranderen.

Uit de simulatie volgt de verwachting, dat het systeem gevoelig reageert op een verandering van de inhoud van het reservoir. De inhoud van het reservoir moet dus bij de praktische uitvoering nauwkeurig de theoretische waarde benaderen.

Verder blijkt ook dat de karakteristieken van de smoorventielen aan de in- en uitgang van de luchtcilinder plus bijbehorende leidingen, nauwkeurig experimenteel bepaald moeten worden, opdat de resultaten van de simulatie praktische betekenis hebben. Een eerste benadering voor het bepalen van de klepconstanten C en b uit de constanten C_v en k_v die door de leveranciers in de katalogi worden opgegeven, staat in bijlage 3.

De enige variabele, die praktisch niet gemeten kan worden, is de polytropische exponent. Deze is alleen te bepalen door de experimentele met de theoretische resultaten te vergelijken. Door de polytropische exponent te variëren kunnen deze resultaten zo goed mogelijk tot overeenstemming worden gebracht.

5. Conclusie

Met behulp van het in dit verslag beschreven systeem is het mogelijk een pneumatische aandrijving te construeren, die ook op het einde van de slag van de zuiger een beheerst bewegingsverloop heeft.

De grootte van de componenten van het beschreven systeem kan met behulp van het simulatieprogramma bepaald worden.

Voorwaarde hiervoor is dat de grootte van alle ingangsvariabelen nauwkeurig experimenteel bepaald moet worden. Dit kan in de praktijk echter problematisch zijn, omdat het moeilijk is de waarde van de karakteristieke variabelen van elk smoorventiel en de bijbehorende leidingen te bepalen met een nauwkeurigheid van $\pm 3\%$. Nader experimenteel onderzoek zal de praktische bruikbaarheid van deze simulatie dus nog moeten aantonen.

LITERATUUR

Beitz, W., Küttner, K.H., Dubbel Taschenbusch für den Maschinenbau. Springer-Verlag, 1987. 16. Auflage.

Dale van, A.L., Stromingscoëfficiënten voor Pneumatische Besturingskleppen. In: Polytechnisch Tijdschrift Werktuigbouw, 35 (1980) nr.3

Faires, M., Simmang, C.M., Thermodynamics. Macmillan Publishing, 1978. 6e Druk.

Festo Katalogus.

Nieuwdorp, J.A., Het Voorspellen van het Dynamisch Gedrag van Luchtcilinders. TUE, rapport nr. WPB-0148, januari 1985.

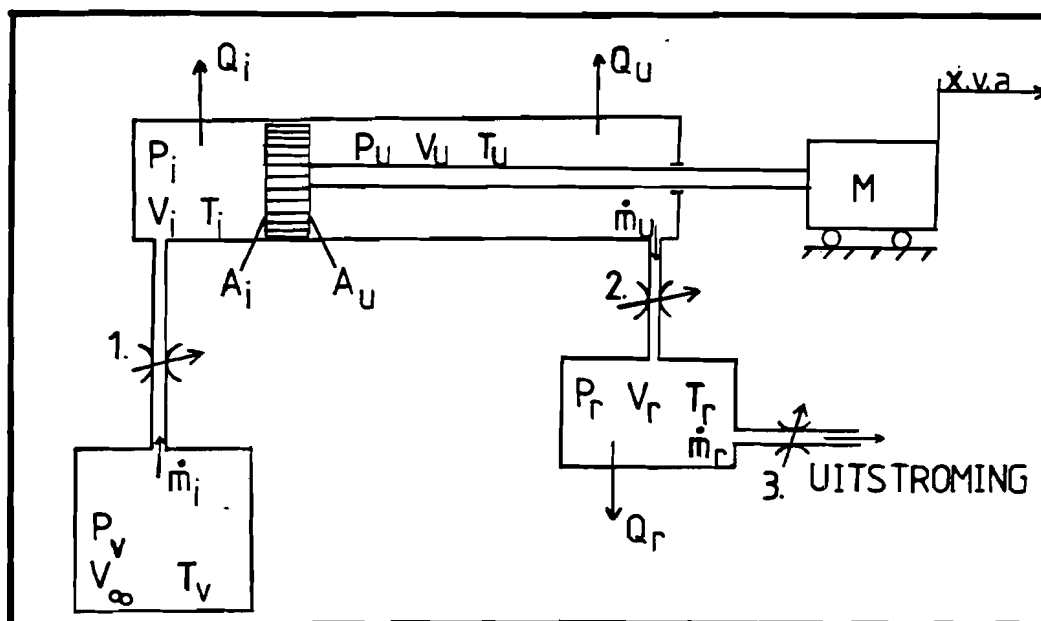
Purdue, D.R., Wood, D., Townsley, M.J., The Design of Pneumatic Circuits. In: Fluid Power Internatoinal (augustus 1969).

VDI/VDE 2173, Strömungstechnische Kenngrößen von Stellventielen und deren Bestimmungen. VDI/VDE, Düsseldorf, september 1962.

Wiesner, H., Krausskopf Taschenbücher Olhydraulik und Pneumatik, TB 4, Beuelemente der Pneumatik. Otto Krausskopf Verlag, Mainz, 1972.

Bijlage 1. Handleiding Pneusim

Het programma Pneusim is een simulatieprogramma dat de beweging van de zuiger van een pneumatische aandrijving kan bepalen, bij een bepaalde grootte van de componenten. Het enige verschil met een standaard pneumatische aandrijving is dat de uitgang van de cilinder verbonden is met een reservoir. De lucht in dit reservoir stroomt via een regelbaar smoorventiel uit in de omgeving. De configuratie van het systeem ziet er als volgt uit:



Figuur 6: Schematisch model systeem

Systeemeisen

Het simulatieprogramma Pneusim draait op een computer met MS Dos besturingssysteem versie 2.0 of hoger. De computer moet één van de volgende grafische kaarten hebben:

- Hercules monochroom
- EGA kleurenkaart
- VGA kleurenkaart

Het werkgeheugen moet minstens 512 KByte groot zijn.

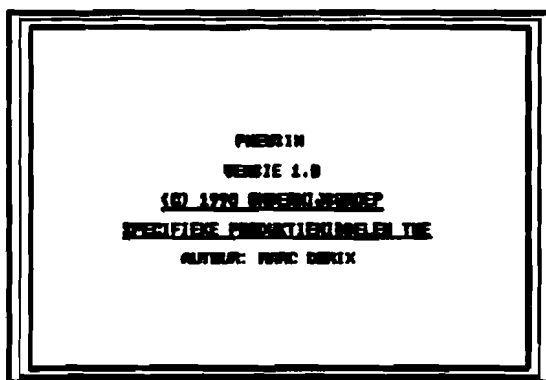
Een co-processor is niet noodzakelijk, maar in verband met

de benodigde rekentijd wel gewenst.

De computer moet over een harde schijf beschikken, die als C-schijf gedefiniëerd is. Op deze harde schijf moet een directory T5 staan. In deze directory worden gegevens van de grafieken opgeslagen.

Opstarten

U moet ervoor zorgen dat de systeemdiskette zich in drive A bevindt. Voer PNEUSIM in en druk de RETURN-toets. Na enkele seconden verschijnt het titelbeeld:



Druk de return toets!

Variabelen invoeren:

Nadat het titelbeeld verschenen is drukt u de RETURN-toets. U moet nu de gevraagde variabelen invoeren en de invoer steeds afsluiten met een druk op de RETURN-toets. Deze variabelen moeten eerst gemeten of experimenteel bepaald worden. De drukken zijn als absolute drukken gedefiniëerd. Wat het aantal tijdstappen betreft, zijn 4000 tijdstappen per seconde een goede aanname i.v.m. de nauwkeurigheid. Nadat alle variabelen ingevoerd zijn, verschijnt een lijst van de ingevoerde variabelen met bijbehorende waarden. U moet nu de RETURN-toets drukken om de resterende variabelen met bijbehorende waarden zichtbaar te maken. Indien u nu nogmaals de RETURN-toets drukt begint het programma te rekenen.

Grafieken tekenen

Als het programma klaar is met rekenen verschijnt een tabel met de keuzemogelijkheden voor het tekenen van de grafieken:

Tik uw keuze in

- 0: stop grafieken tekenen
- 1: Pi-tijd grafiek
- 2: Pu-tijd grafiek
- 3: Pr-tijd grafiek
- 4: plaats-tijd grafiek
- 5: snelheid-tijd grafiek
- 6: versnelling-tijd grafiek

U moet nu het nummer van de gewenste keuze intoetsen, gevolgd door RETURN.

Indien u hebt gekozen voor het tekenen van een grafiek verschijnt deze na een bepaalde rekentijd.

U kunt terugkeren naar het overzicht, door twee keer de RETURN-toets te drukken.

Als u nummer 0 hebt ingevoerd verschijnt de vraag of u het programma wilt veranderen. Deze vraag moet u met ja of nee beantwoorden.

Veranderen van de variabelen

Nadat u het programma niet verlaten hebt verschijnt de vraag of u de variabelen veranderen wilt. Deze vraag moet wederom met ja of nee beantwoord worden.

Wordt deze vraag met nee beantwoord, dan begint het programma opnieuw te rekenen, waarna u weer grafieken kunt tekenen. Als u deze vraag met ja beantwoordt, verschijnt een overzicht van de variabelen die u kunt veranderen.

0: invoer stoppen	
1 : Pv	15: Ci
2 : Pi0	16: Cu
3 : Pu0	17: Cr
4 : Pr0	18: bi
5 : Tv	19: bu
6 : Ti0	20: br
7 : Tu0	21: M
8 : Tr0	22: Fw
9 : Vr	23: b
10: Vvi	24: TT
11: Vvu	25: NN
12: L	26: N1
13: Ai	27: N2
14: Au	28: N3

Voer het nummer in, van de variabele die u wenst te veranderen:

Voor het veranderen van een bepaalde variabele voert u het bijbehorende nummer in, gevolgd door RETURN. U kunt dan de nieuwe waarde invoeren . De oude waarde staat tussen haakjes.

Nadat u het veranderen van de variabelen beëindigd hebt, begint het programma met de nieuwe waarden te rekenen. Nadat het rekenen beëindigd is kunt u weer grafieken tekenen.

Bijlage 2. Het simulatieprogramma Pneusim in turbo pascal

```

PROGRAM Simulatie;
USES GRAPH,Crt;
TYPE Coordinatentype=record
  X,
  Y:real;
end;

grafgegevens=File of coordinatentype;
titelstring=string[75];
astitelnaam=string[60];

VAR
  Pv,Tv,Pi0,Ti0,Pu0,Tu0,Vr,Tr0,Pr0,P0      : REAL;
  M,Fw,b,Fv                                : REAL;
  Ai,Au,L,VVi,VVu                          : REAL;
  Pi,Ti,Mi,Mi0,MMi                        : REAL;
  Pu,Tu,Mu,Mu0,MMu                        : REAL;
  Pr,Tr,Mr,Mr0,MMr                        : REAL;
  a,v,x                                     : REAL;
  Ci,Cu,Cr,bi,bu,br,R                    : REAL;
  M1,M2,M3                                 : REAL;
  b                                         : CHAR;
  gd,gm                                    : INTEGER;
  N,w,q                                    : INTEGER;
  T,dt,TT,NN                              : REAL;
  dPi,dPu,dPr                              : REAL;
  z,Cp,Cv,molg                             : REAL;
  grafiek1,grafiek2,grafiek3              : grafgegevens;
  grafiek4,grafiek5,grafiek6              : grafgegevens;
  coordinaat                               : coordinatentype;

  {$I grafiek.pas}

PROCEDURE ver ; {versnelling bep.}
BEGIN
  IF v>0.001 THEN Fv:=-Fw
    ELSE BEGIN
      IF v<-0.001 THEN Fv:=-Fw ELSE Fv:=0
        END;
  a:=((Pi*Ai)-(Pu*Au)-(P0*(Ai-Au))-(b*v)-Fv)/M
END;

PROCEDURE imas ; {massastr. Mi bep.}
BEGIN
  IF Pi/Pv=1 THEN Mi0:=-SQRT(1-SQR(((Pv/Pi)-bi)/(1-bi)))
    ELSE Mi0:= SQRT(1-SQR(((Pi/Pv)-bi)/(1-bi)));
  IF (Pi/Pv)<=bi THEN Mi0:=1;
  Mi:=-1.2046*Pv*Ci*Mi0
END;

PROCEDURE umas ; {massastr. Mu bep.}
BEGIN
  IF Pr/Pu=1 THEN Mu0:=-SQRT(1-SQR(((Pu/Pr)-bu)/(1-bu)))
    ELSE Mu0:= SQRT(1-SQR(((Pr/Pu)-bu)/(1-bu)));
  IF (Pr/Pu)<=bu THEN Mu0:=1;
  Mu:=-1.2046*Pu*Cu*Mu0
END;

PROCEDURE rmas ; {massastr. Mr bep.}
BEGIN

```

```

IF PO/Pr)=1 THEN Mr0:=-SQRT(1-SQR(((Pr/PO)-br)/(1-br)))
ELSE Mr0:=-SQRT(1-SQR(((PO/Pr)-br)/(1-br)));
IF (PO/Pr)<=br THEN Mr0:=1;
Mr:=1.2046*Pr*Cr*Mr0
END;

```

```

PROCEDURE idruk ; (dPi bep.)
BEGIN
dPi:=(W1/((Aj*x)+VVj))*((R*(Ti+((W1-1)/(z-1)*(Tv-Ti))*Ni)-(Pj*Aj*v))
END;

```

```

PROCEDURE wdruk ; (dPu bep.)
BEGIN
dPu:=(W2/((Au*(L-x))+VVu))*((Pu*Au*v)-(R*Tu*Mu))
END;

```

```

PROCEDURE rdruk ; (dPr bep.)
BEGIN
dPr:=(W3/Vr)*((R*(Tr*(W3-1)/(z-1)*(Tu-Tr))*Mu)-(R*Tr*Mr))
END;

```

```

BEGIN
R:=288;
z:=1.4;
molg:=29e-3;
PO:=1e5;
gd:=detect;
initgraph(gd, gm, '');
ClearDevice;
SetLineStyle(SolidLn, 0, 3);
OutTextXY(round(0.451*getmaxx), round(0.35*getmaxy), 'PNEUSIM');
OutTextXY(round(0.437*getmaxx), round(0.40*getmaxy), 'VERSIE 1.0');
OutTextXY(round(0.365*getmaxx), round(0.45*getmaxy), '(C) 1990 ONDERWIJSGROEP');
OutTextXY(round(0.320*getmaxx), round(0.50*getmaxy), 'SPECIFIEKE PRODUKTIE MIDDELEN TUE');
OutTextXY(round(0.365*getmaxx), round(0.455*getmaxy), '_____');
OutTextXY(round(0.320*getmaxx), round(0.505*getmaxy), '_____');
OutTextXY(round(0.3875*getmaxx), round(0.55*getmaxy), 'AUTEUR: MARC DERIX');
OutTextXY(round(0.3875*getmaxx), round(0.9*getmaxy), 'Druk de return toets:');
OutTextXY(round(0.3875*getmaxx), round(0.905*getmaxy), '_____');
Rectangle(round(0.2125*getmaxx), round(0.75*getmaxy), round(0.7875*getmaxx), round(0.16*getmaxy));
Rectangle(round(0.1875*getmaxx), round(0.775*getmaxy), round(0.8125*getmaxx), round(0.135*getmaxy));
SetLineStyle(SolidLn, 0, 1);
Rectangle(round(0.2*getmaxx), round(0.7625*getmaxy), round(0.8*getmaxx), round(0.1475*getmaxy));

```

```

READLN;
closegraph;
ClrScr;
WRITELN('Dit is een simulatie voor het bepalen van de beweging van een luchtcilinder,');
WRITELN('waarbij de uitgang van de cilinder via een extra reservoir met de buiten-');
WRITELN('lucht verbonden is. ');
WRITELN;
WRITELN;
WRITELN;
WRITELN('Alvorens de simulatie te kunnen uitvoeren moeten we systeemgegevens invoeren:');
WRITELN;
WRITE('De voedingsdruk [N/m²]: '); READLN(Pv);
WRITE('De temperatuur van de ingaande lucht [K]: '); READLN(Tv);
WRITELN('De druk aan de inlaat zijde in de luchtcilinder, ');
WRITE('bij het begin van de beweging [N/m²]: '); READLN(Pi0);
WRITELN('De temperatuur aan de inlaat zijde in de luchtcilinder, ');
WRITE('bij het begin van de beweging [K]: '); READLN(Ti0);
WRITELN('De druk aan de uitlaat zijde in de luchtcilinder, ');
WRITE('bij het begin van de beweging [N/m²]: '); READLN(Pu0);
WRITELN('De temperatuur aan de uitlaat zijde in de luchtcilinder, ');

```

```

WRITE('bij het begin van de beweging [K]:'); READLN(Tu0);
WRITE('De druk in het reservoir, bij het begin van de beweging [N/m²]: '); READLN(Pr0);
WRITE('De temperatuur in het reservoir, bij het begin van de beweging [K]: '); READLN(Tr0);
WRITE('De conductantie inlaatzijde [m²m²/(N*s)]: '); READLN(Ci);
WRITE('De conductantie uitlaatzijde cilinder [m²m²/(N*s)]: '); READLN(Cu);
WRITE('De conductantie uitlaatzijde reservoir [m²m²/(N*s)]: '); READLN(Cr);
WRITE('De kritische drukverhouding inlaatzijde [-]: '); READLN(bi);
WRITE('De kritische drukverhouding uitlaatzijde luchtcilinder [-]: '); READLN(bu);
WRITE('De kritische drukverhouding uitlaatzijde reservoir [-]: '); READLN(br);
WRITE('De polytropische exponent inlaatzijde luchtcilinder (1<N1<=k): '); READLN(N1);
WRITE('De polytropische exponent uitlaatzijde luchtcilinder (1<N2<=k): '); READLN(N2);
WRITE('De polytropische exponent reservoir (1<N3<=k): '); READLN(N3);
WRITE('De slaglengte van de cilinder [m]: '); READLN(L);
WRITE('Het oppervlak van de luchtcilinder aan de inlaatzijde [m²]: '); READLN(Ai);
WRITE('Het oppervlak van de luchtcilinder aan de uitlaatzijde [m²]: '); READLN(Au);
WRITE('Het leidingvolume aan de ingang van de luchtcilinder [m³]: '); READLN(VVi);
WRITE('Het leidingvolume aan de uitgang van de luchtcilinder [m³]: '); READLN(VVu);
WRITE('De massa van de bewegende delen [Kg]: '); READLN(M);
WRITE('De constante wrijvingskracht [N]: '); READLN(Fv);
WRITE('De dempingsconstante [N s/m]: '); READLN(b);
WRITE('Grootte van het tijdsinterval [s]: '); READLN(TT);
WRITE('Aantal tijdstappen: '); READLN(NN);
WRITE('Inhoud reservoir [m³]: '); READLN(Vr);
N:=1;

```

```

WHILE N=1 DO
BEGIN

```

```

  ClrScr;
  WRITELN('Pv =', Pv, ' [N/m²]');
  WRITELN('Tv =', Tv, ' [K]');
  WRITELN('Pi0 =', Pi0, ' [N/m²]');
  WRITELN('Ti0 =', Ti0, ' [K]');
  WRITELN('Pu0 =', Pu0, ' [N/m²]');
  WRITELN('Tu0 =', Tu0, ' [K]');
  WRITELN('Pr0 =', Pr0, ' [N/m²]');
  WRITELN('Tr0 =', Tr0, ' [K]');
  WRITELN('Ci =', Ci, ' [m²m²/(N*s)]');
  WRITELN('Cu =', Cu, ' [m²m²/(N*s)]');
  WRITELN('Cr =', Cr, ' [m²m²/(N*s)]');
  WRITELN('bi =', bi, ' [-]');
  WRITELN('bu =', bu, ' [-]');
  WRITELN('br =', br, ' [-]');
  WRITELN('N1 =', N1, ' [-]');
  WRITELN('N2 =', N2, ' [-]');
  WRITELN('N3 =', N3, ' [-]');
  WRITELN('L =', L, ' [m]');
  WRITELN('Ai =', Ai, ' [m²]');
  WRITELN('Au =', Au, ' [m²]');
  WRITELN('VVi =', VVi, ' [m³]');
  WRITELN('VVu =', VVu, ' [m³]');
  READLN;
  ClrScr;
  WRITELN('M =', M, ' [Kg]');
  WRITELN('Fv =', Fv, ' [N]');
  WRITELN('Vr =', Vr, ' [m³]');
  WRITELN('Dempingsconstante =', b, ' [N s/m]');
  WRITELN('Grootte tijdsinterval =', TT, ' [s]');
  WRITELN('Aantal tijdstappen =', NN);
  READLN;

```

```

  Cv:=-R/(z-1); Cp:=(R*z)/(z-1);
  Pv:=Pv; Tv:=Tv; Pi:=-Pi0; Ti:=-Ti0; Pu:=-Pu0; Tu:=-Tu0; Tr:=-Tr0; Pr:=-Pr0;
  x:=0; v:=0; a:=0;
  T:=0; dt:=TT/NN;
  assign(grafiek1,'c:\t5\graf1'); {*****}
  rewrite(grafiek1);

```

```

assign(grafiek2, 'c:\t5\graf2');
rewrite(grafiek2);
assign(grafiek3, 'c:\t5\graf3');
rewrite(grafiek3);
assign(grafiek4, 'c:\t5\graf4');
rewrite(grafiek4);
assign(grafiek5, 'c:\t5\graf5');
rewrite(grafiek5);
assign(grafiek6, 'c:\t5\graf6');
rewrite(grafiek6);
WHILE T<=TT DO
  BEGIN
    coördinaat.x:=T*10;
    coördinaat.y:=Pi/100000;
    WRITE(grafiek1, coördinaat);
    coördinaat.x:=T*10;
    coördinaat.y:=-Pu/100000;
    WRITE(grafiek2, coördinaat);
    coördinaat.x:=T*10;
    coördinaat.y:=-Pr/100000;
    WRITE(grafiek3, coördinaat);
    coördinaat.x:=T*10;
    coördinaat.y:=-x*10;
    WRITE(grafiek4, coördinaat);
    coördinaat.x:=T*10;
    coördinaat.y:=v;
    WRITE(grafiek5, coördinaat);
    coördinaat.x:=T*10;
    coördinaat.y:=a;
    WRITE(grafiek6, coördinaat);
    T:=T+dT;
    MMi:=(Pi*((Aj*x)+VVi))/(R*Ti);
    MMu:=(Pu*((Au*(L-x))+VVu))/(R*Tu);
    MMr:=(Pr*Vr)/(R*Tr);
    imas;
    wmas;
    rmas;
    idruk;
    wdruk;
    rdruk;
    Pi:=-Pi+(dPi*dT);
    Pu:=-Pu+(dPu*dT);
    Pr:=-Pr+(dPr*dT);
    IF x<=0 THEN BEGIN
      IF v<0 THEN v:=0
      END;
    IF x<=0 THEN BEGIN
      IF a<0 THEN a:=0
      END;
    IF x>=L THEN BEGIN
      IF v>0 THEN v:=0
      END;
    IF x>=L THEN BEGIN
      IF a>0 THEN a:=0
      END;
    IF x>=L THEN x:=-L;
    x:=-x+(v*dT);
    v:=-v+(a*dT);
    ver;
    IF x<0 THEN x:=0;
    IF x<=0 THEN BEGIN
      IF a<0 THEN a:=0
      END;
    IF x>=L THEN BEGIN
      IF a>0 THEN a:=0

```

```

END;
Ti:=(Pi*((Ai*x)+VVi))/(R*(MMi+(Mi*dT)));
Tu:=(Pu*((Au*(L-x))+VVu))/(R*(MMu-(Mu*dT)));
Tr:=(Pr*Vr)/(R*(MMr+(Mu*dT)-(Mr*dT)));

```

```

( WRITELN('T=',T);
  WRITELN('dPi=',dPi);
  WRITELN('dPu=',dPu);
  WRITELN('dPr=',dPr);
  WRITELN('Pi=',Pi);
  WRITELN('Pu=',Pu);
  WRITELN('Pr=',Pr);
  WRITELN('Ti=',Ti);
  WRITELN('Tu=',Tu);
  WRITELN('Tr=',Tr);
  WRITELN('Mi=',Mi);
  WRITELN('Mu=',Mu);
  WRITELN('Mr=',Mr);
  WRITELN('a=',a);
  WRITELN('v=',v);
  WRITELN('x=',x);
  WRITELN('MMi=',MMi);
  WRITELN('MMu=',MMu);
  WRITELN('MMr=',MMr);
  READLN;
)

```

```
ClrScr;
```

```

END;
close(grafiek1);
close(grafiek2);
close(grafiek3);
close(grafiek4);
close(grafiek5);
close(grafiek6);
gd:=detect;
w:=1;
REPEAT
  ClrScr;
  WRITELN('Tik uw keuze in');
  WRITELN;
  WRITELN('0: stop grafieken tekenen');
  WRITELN('1: Pi-tijd grafiek');
  WRITELN('2: Pu-tijd grafiek');
  WRITELN('3: Pr-tijd grafiek');
  WRITELN('4: plaats-tijd grafiek');
  WRITELN('5: snelheid-tijd grafiek');
  WRITELN('6: versnelling-tijd grafiek');
  WRITELN;
  READLN(w);
  CASE w OF
    1: BEGIN initgraph(gd, gm, '');
        grafic(grafiek1, 'Pi-tijd', 'tijd [x 1e-1 s]', 'druk [x 1e5 Pa]');
        closegraph;
        END;
    2: BEGIN initgraph(gd, gm, '');
        grafic(grafiek2, 'Pu-tijd', 'tijd [*1e-1 s]', 'Pu [* 1e5 Pa]');
        closegraph;
        END;
    3: BEGIN initgraph(gd, gm, '');
        grafic(grafiek3, 'Pr-tijd', 'tijd [*1e-1 s]', 'Pr [* 1e5 Pa]');
        closegraph;
        END;
    4: BEGIN initgraph(gd, gm, '');

```

```

        grafic(grafiek4,'verplaatsing-tijd','tijd [*1e-1 s]','x [* 1e-1 m]');
        closegraph;
    END;
5: BEGIN initgraph(gd,gm,'');
        grafic(grafiek5,'snelheid-tijd','tijd [*1e-1 s]','v [m/s]');
        closegraph;
    END;
6: BEGIN initgraph(gd,gm,'');
        grafic(grafiek6,'versnelling-tijd','tijd [1e-1 s]','a [m/s*s]');
        closegraph;
    END;
END;
UNTIL w=0;
WRITE('Wilt u het programma verlaten (ja of nee):'); READLN(h);
IF h='j' THEN N:=0;
IF h<>'j' THEN
    BEGIN
        q:=1;
        WHILE q<>0 DO
            BEGIN
                ClrScr;
                WRITELN('0: invoer stoppen');
                WRITE('1 : Pv          ');
                WRITELN('15: Ci');
                WRITE('2 : Pi0          ');
                WRITELN('16: Cu');
                WRITE('3 : Pu0          ');
                WRITELN('17: Cr');
                WRITE('4 : Pr0          ');
                WRITELN('18: bi');
                WRITE('5 : Tv          ');
                WRITELN('19: bu');
                WRITE('6 : Ti0          ');
                WRITELN('20: br');
                WRITE('7 : Tu0          ');
                WRITELN('21: M');
                WRITE('8 : Tr0          ');
                WRITELN('22: Fw');
                WRITE('9 : Vr          ');
                WRITELN('23: b');
                WRITE('10: Vvi          ');
                WRITELN('24: IT');
                WRITE('11: Vvu          ');
                WRITELN('25: NN');
                WRITE('12: L           ');
                WRITELN('26: N1');
                WRITE('13: Ai          ');
                WRITELN('27: N2');
                WRITE('14: Au          ');
                WRITELN('28: N3');
                WRITELN;
                WRITELN;
                WRITE('Voer het nummer in, van de variabele die u wenst te veranderen: '); READLN(q);
                CASE q OF
                    1: BEGIN WRITE('Pv(' ,Pv,')= '); READLN(Pv) END;
                    2: BEGIN WRITE('Pi0(' ,Pi0,')= '); READLN(Pi0) END;
                    3: BEGIN WRITE('Pu0(' ,Pu0,')= '); READLN(Pu0) END;
                    4: BEGIN WRITE('Pr0(' ,Pr0,')= '); READLN(Pr0) END;
                    5: BEGIN WRITE('Tv(' ,Tv,')= '); READLN(Tv) END;
                    6: BEGIN WRITE('Ti0(' ,Ti0,')= '); READLN(Ti0) END;
                    7: BEGIN WRITE('Tu0(' ,Tu0,')= '); READLN(Tu0) END;
                    8: BEGIN WRITE('Tr0(' ,Tr0,')= '); READLN(Tr0) END;
                    9: BEGIN WRITE('Vr(' ,Vr,')= '); READLN(Vr) END;
                    10: BEGIN WRITE('Vvi(' ,Vvi,')= '); READLN(Vvi) END;
                    11: BEGIN WRITE('Vvu(' ,Vvu,')= '); READLN(Vvu) END;
                END
            END
        END
    END

```



```
12: BEGIN WRITE('L(',L,')= '); READLN(L) END;
13: BEGIN WRITE('Ai(',Ai,')= '); READLN(Ai) END;
14: BEGIN WRITE('Au(',Au,')= '); READLN(Au) END;
15: BEGIN WRITE('Ci(',Ci,')= '); READLN(Ci) END;
16: BEGIN WRITE('Cu(',Cu,')= '); READLN(Cu) END;
17: BEGIN WRITE('Cr(',Cr,')= '); READLN(Cr) END;
18: BEGIN WRITE('bi(',bi,')= '); READLN(bi) END;
19: BEGIN WRITE('bu(',bu,')= '); READLN(bu) END;
20: BEGIN WRITE('br(',br,')= '); READLN(br) END;
21: BEGIN WRITE('M(',M,')= '); READLN(M) END;
22: BEGIN WRITE('Fw(',Fw,')= '); READLN(Fw) END;
23: BEGIN WRITE('b(',b,')= '); READLN(Fw) END;
24: BEGIN WRITE('TT(',TT,')= '); READLN(TT) END;
25: BEGIN WRITE('NN(',NN,')= '); READLN(NN) END;
26: BEGIN WRITE('N1(',N1,')= '); READLN(N1) END;
27: BEGIN WRITE('N2(',N2,')= '); READLN(N2) END;
28: BEGIN WRITE('N3(',N3,')= '); READLN(N3) END;
END;
```

END;

END;

END;

END.

```

PROCEDURE grafrechthoek;
BEGIN
  ClearViewPort;
  SetLineStyle(solidln,0,normwidth);
  Rectangle(0,0,275,70);
  Rectangle(2,2,273,67)
END;
{*****}

```

```

PROCEDURE schaal(var extr:real;max:real;min:real);

```

```

VAR
  schl      :real;
  i         :integer;

```

```

BEGIN
  i:=1;
  schl:=(max-min)/10;
  IF schl<1 THEN
    BEGIN
      extr:=-Int(max-min+1)/10;
    END
    ELSE
      BEGIN
        WHILE i*5<schl DO
          BEGIN
            i:=i+1;
          END;
          extr:=-i*5
        END;
        IF min<=-0.5*extr THEN extr:=-Int(11*extr)/10;
      END;

```

```

{*****}

```

```

PROCEDURE grafic(var graf:grafgegevens;
                 grafiektitel:titelstring;
                 xastitel,yastitel:astitelnaam);

```

```

var getal      :string[10];
    text       :string[25];
    sX         :real;
    sY,o       :real;
    extrX,extrY :real;
    MaxX,MaxY  :real;
    Gd,Gm      :integer;
    i,j        :integer;
    Miny,Minx  :real;

```

```

BEGIN
  SetBkColor(lightgray);
  SetColor(red);

  SetLineStyle(solidln,0,1);
  Rectangle(12,10,getmaxX-12,getmaxY-320);
  Rectangle(10,8,getmaxX-10,getmaxY-318);
  OutTextXY(100,17,grafiektitel);

```

```

Rectangle(12,50,getmaxX-12,getmaxY-50);
Rectangle(10,48,getmaxX-10,getmaxY-48);

Rectangle(12,getmaxY-28,getmaxX-12,getmaxY-12);
Rectangle(10,getmaxY-30,getmaxX-10,getmaxY-10);
OutTextXY(150,getmaxY-22,'ONDERWIJSGROEP SPECIFIIEKE PRODUKTIEWIDDELEN TUE 1990');

SetLineStyle(solidln,0,1);
Line(round(0.125*getmaxX),getmaxY-75,round(0.889*getmaxX),getmaxY-75); {x-as}
Line(round(0.125*getmaxX),getmaxY-75,round(0.125*getmaxX),getmaxY-275); {y-as}

Reset(graf);
Read(graf,coördinaat);
MaxX:=coördinaat.X;
MaxY:=coördinaat.Y;
Read(graf,coördinaat);
WHILE Not EOF(graf) DO
  BEGIN
    WITH coördinaat DO
      BEGIN
        IF MaxX<X THEN MaxX:=X;
        IF MaxY<Y THEN MaxY:=Y
      END;
      Read(graf,coördinaat)
    END;
  WITH coördinaat DO
    BEGIN
      IF MaxX<X THEN MaxX:=X;
      IF MaxY<Y THEN MaxY:=Y
    END;
  Close(graf);
  Reset(graf);
  Read(graf,coördinaat);
  MinY:=coördinaat.y;
  Read(graf,coördinaat);
  WHILE not EOF(graf) DO
    BEGIN
      WITH coördinaat DO
        BEGIN
          IF MinY>y THEN MinY:=y
        END;
        Read(graf,coördinaat);
      END;
    WITH coördinaat DO
      BEGIN
        IF MinY>y THEN MinY:=-y
      END;
    Close(graf);
    Minx:=0;
    IF MinY>=0 THEN MinY:=0;
    schaal(extrX,maxX,minX);
    sX:=0;
    str(sX:2:1,getal);
    OutTextXY(round(0.125*getmaxX),280,getal);
    j:=1;
    sX:=j*extrX;

    OutTextXY(470,290,xastitel);

    WHILE sX<=extrx*10 DO {x-as indelen}
      BEGIN
        str(sX:2:1,getal);
        OutTextXY(round(0.125*getmaxx+j*0.0764*getmaxx),280,getal);
        j:=1;

```

```

WHILE i<5 DO
  BEGIN
    OutTextxy(round(0.125*getmaxx+(j-1)*0.0764*getmaxx+i*0.0153*getmaxx-3),271, '|');
    j:=i+1;
  END;
Line(round(0.125*getmaxx+j*0.0764*getmaxx),getmaxy-75,round(0.125*getmaxx+j*0.07638*getmaxx),getmaxy-275);
j:=j+1;
sX:=-extrX*j;
END;

schaal(extrY,maxY,miny);

OutTextXY(65,60,yastitel);
o:=-INT((miny/extry)-0.5);
sY:=-o*extry;
j:=0;
str(sY:2:1,getal);
OutTextXY(round(0.0625*getmaxX),getmaxY-75,getal);
j:=j+1;
sY:=extry*j-o*extry;
WHILE j<=10 DO      {y-as indelen}
  BEGIN
    str(sY:2:1,getal); {++++++++++})
    OutTextXY(round(0.0625*getmaxX),getmaxY-75-j*20,getal);
    i:=1;
    WHILE i<5 DO
      BEGIN
        OutTextXY(round(0.118*getmaxX),getmaxY-75-(j-1)*20-j*4-3,'-');
        j:=i+1;
      END;
      Line(round(0.125*getmaxX),getmaxY-75-j*20,round(0.889*getmaxX),getmaxY-75-j*20);
      j:=j+1;
      sY:=extry*j-o*extry;
    END;
    i:=1;

SetColor(blue);
SetLineStyle(solidln,0,1); {*****}
Reset(graf);
read(graf,coordinaat);
Moveto(round(0.125*getmaxX)+round(coordinaat.x*0.764*getmaxx/(extrx*10)),
        getmaxY-75-round(o*20)-round(coordinaat.y*(200-o*20)/(extry*(10-o))));

Read(graf,coordinaat);
i:=1;
WHILE not EOF(graf) DO
  BEGIN
    Lineto(round(0.125*getmaxX)+round(coordinaat.x*0.764*getmaxx/(extrx*10)),
           getmaxY-75-round(o*20)-round(coordinaat.y*(200-o*20)/(extry*(10-o))));
    Read(graf,coordinaat)
  END;
  Lineto(round(0.125*getmaxx)+round(coordinaat.x*0.764*getmaxx/(extrx*10)),
         getmaxY-75-round(o*20)-round(coordinaat.y*(200-o*20)/(extry*(10-o))));
  Readln;
Close(graf);

Setviewport(75,30,350,100,false);
Readln;
END;

```

BIJLAGE 3. Globale bepaling van de conductantie C uit K_v en C_v

De conductantie, C die in de CETOP-aanbeveling RP 50 P gebruikt wordt voor de beschrijving van de massastroom door een smoorventiel, wordt door de meeste fabrikanten nog niet in hun katalogi opgegeven. Bij het bepalen van de componenten van het systeem voor een bepaalde toepassing, is het echter noodzakelijk om de waarde van de conductantie C bij benadering te kennen.

In de katalogi van de fabrikanten wordt meestal een Normalnennendurchfluss opgegeven in liters per minuut. Via een omreken tabel die eveneens in de catalogus staat, kan hieruit de constante K_v en C_v bepaald worden. Het nadeel van deze waarden K_v en C_v is dat deze gedefinieerd zijn voor waterstroming. De omrekening van deze klepconstanten in de heel anders gedefinieerde conductantie C is riskant en zal nooit tot een exacte uitkomst leiden.

Bij benadering geldt er:

$$C = 3.972 \cdot 10^{-6} \cdot K_v \quad \text{met } K_v \text{ [m}^3\text{/h per kg/cm}^2\text{]} \\ C \text{ [m}^3\text{/s per N/m}^2\text{]}$$

$$C = 3.390 \cdot 10^{-6} \cdot C_v \quad \text{met } C_v \text{ [US-gallon per mm per p.s.i.]} \\ C \text{ [m}^3\text{/s per N/m}^2\text{]}$$

Indien de kritische drukverhouding b niet door de fabrikant wordt opgegeven moet ook hiervoor een waarde aangenomen worden. De waarde 0,4 is meestal een goede benadering voor de kritische drukverhouding van één klep.

Voor de bepaling van de totale conductantie en kritische drukverhouding van een serieschakeling van kleppen en smoorventielen zie bijlage 4.

BJLAGE 4. Het bepalen van de totale conductantie en kritische drukverhouding bij een serieschakeling van kleppen

Ook de in CETOP RP 50 P gehanteerde formule en de daarin verwerkte constanten, blijken moeilijk hanteerbaar bij berekening van de circuitconstante van een systeem met meer dan één klep in serie geschakeld.

Dit is voor het Franse industriële researchcentrum CETIM aanleiding geweest na te gaan, of hiervoor geen betere mogelijkheden bestaan. Het resultaat van dit onderzoek was, dat voor een betere hanteerbaarheid bij berekeningen een doorstroomcoëfficiënt α werd gedefinieerd.

Deze geeft de verhouding tussen de werkelijk gemeten doorstroomcapaciteit en de theoretische hoeveelheid door een ideaal gevormde straalpijp met dezelfde in- en uitlaatdoorsnede, gemeten onder precies dezelfde omstandigheden, weer.

Deze α moet eerst voor elke klep bepaald worden:

$$\alpha = 3.497 \cdot 10^2 \cdot C / (A_2 \cdot \sqrt{(1-b)})$$

A_2 = het werkelijk oppervlak van de uitlaat dat door de koppelingsnippel wordt bepaald in m^2 .

De berekening van α -totaal gaat dan als volgt:

$$(\alpha_t^2 \cdot A_{z1})^{-1} = (\alpha_1^2 \cdot A_{z1}^2)^{-1} + (\alpha_2^2 \cdot A_{z2}^2)^{-1} + \dots + (\alpha_n^2 \cdot A_{zn}^2)^{-1}$$

α_t = α -totaal van de serieschakeling

A_{z1} = werkelijk oppervlak van de uitlaat van klep i

A_{z1} = werkelijk oppervlak van de uitlaat van klep 1

α_1 = α van klep i

Aan de hand van α_t kan men de totale kritische drukverhouding bepalen:

$$(1-b_t)^{-1} = 1 + 0,77 \cdot \alpha_t + 0,3 \cdot \alpha_t^2$$

De conductantie C voor het in seriegeschakelde systeem volgt dan uit de volgende vergelijking:

$$C_t = 0.286 \cdot 10^{-2} \cdot \alpha_t \cdot A_{z1} \cdot \sqrt{(1-b_t)}$$

Voor verdere informatie zie van Dale (1980).

Deze formules zijn theoretische benaderingen en zullen de werkelijkheid dan ook niet precies beschrijven. Voor het bepalen van de juiste kleppen en smoorventielen is deze benadering echter voldoende, indien men een veiligheidsmarge van 30% aanhoudt. De conductantie van het in serie geschakelde systeem moet 30% groter zijn dan de conductantie die met het simulatieprogramma Pneusim berekend is. Deze grote veiligheidsmarge is noodzakelijk om de leidingweerstand en de in- en uitstroomweerstand in de cilinder en het in reservoir in rekening te brengen. Indien dan later zou blijken dat de aangenomen veiligheidsmarge te groot is, kan men met de instelbare smoorventielen aan de in- en uitgang van de cilinder en het reservoir de totale conductantie veranderen.

Voor het bepalen van de uiteindelijke grootte van het reservoir en het smoorventiel aan dit reservoir moeten de werkelijke C_t en b_t gemeten worden.

BIJLAGE 5. Werkwijze voor het bepalen van de juiste componenten van het systeem

Hieronder volgt een chronologische opsomming van de te verrichten stappen, om de juiste componenten van het systeem te bepalen.

- 1) Bepaal de systeemeisen met betrekking tot de te verplaatsen massa, de slaglengte en de tijd waarin de slag uitgevoerd moet worden.
- 2) Kies een cilinder uit de catalogus, die de juiste slaglengte heeft en maak een schatting van de diameter.
- 3) Schat de waarde van de conductantie van de serieschakeling van de kleppen
bv. $C_i = C_u = 1 \cdot 10^{-8}$ [m³/s per N/m²] en
 $C_r = 1 \cdot 10^{-7}$ [m³/s per N/m²]
- 4) Schat of meet de andere ingangsvariabelen zoals F_w, b, P_v, T_v, \dots
- 5) Bepaal met behulp van het simulatieprogramma Pneusim de juiste configuratie van het systeem, zoals beschreven in hoofdstuk 4.
- 6) Bepaal aan de hand van de berekende waarden van de conductanties de juiste kleppen en smoorventielen uit de catalogus, zoals beschreven in bijlage 4 en 5.
- 7) Bouw het systeem en meet de werkelijke conductanties, kritische drukverhoudingen en wrijvingskracht.
- 8) Bepaal opnieuw met behulp van het programma Pneusim de grootte van het reservoir.
- 9) Voeg nu ook het reservoir aan het systeem toe en stel het ventiel aan de uitgang van het reservoir zo in, dat er geen sprong in de snelheid op het einde van de slag optreedt.

Nader experimenteel onderzoek zal moeten aantonen of de stappen 7 en 8 kunnen vervallen.

BIJLAGE 6. Aanbevelingen voor verder onderzoek

Om de bruikbaarheid van het programma Pneusim aan te tonen is nader experimenteel onderzoek noodzakelijk. Verder onderzoek zal zich dan ook moeten richten op het maken van een proefopstelling en het verrichten van metingen aan deze proefopstelling.

De volgende vragen moeten nog beantwoord worden:

- Komt het experimenteel bepaalde snelheidsverloop overeen met het berekende snelheidsverloop? Indien niet, waarom niet?
- Is het mogelijk de conductantie en de kritische drukverhouding nauwkeurig genoeg te berekenen, zonder dat deze eerst gemeten moeten worden?
- Kan het aantal ingangsvariabelen verkleind worden, zonder dat de nauwkeurigheid van de berekening afneemt?
- Wat is de waarde van de polytropische exponent?

Met betrekking tot de proefopstelling kan het volgende opgemerkt worden:

- Kies de cilinder zodanig dat het volume van het reservoir niet te klein is ($V_r \geq 4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$), omdat anders de invloed van het leidingvolume te groot wordt en omdat een kleine verandering van het volume (onnauwkeurigheid) een te grote percentuele verandering van het volume tot gevolg heeft (bv. slaglente=0.3m en diameter=40mm).
- Kies de te bewegen massa groot ten opzichte van de cilinder (bij bovengenoemde cilinder bijvoorbeeld $m=10 \text{ Kg}$). Hierdoor wordt het verloop van de snelheid in de tijd gunstig beïnvloed.
- Kies de kleppen aan de in- en uitgang van de cilinder zo groot mogelijk. Regel de weerstand van de serieschakeling van kleppen en smoorventielen met behulp van regelbare smoorventielen aan de in- en uitgang van de cilinder.

- Let erop dat de volumestroom door een klep of smoorventiel gemeten wordt bij standaardcondities ($T=293,15K$ en $P_o=1,01325bar$). Indien dit niet mogelijk is moet de volumestroom omgerekend worden, om de conductantie te kunnen bepalen.
- Kies de in- en uitgang van de kleppen en van de cilinder zo groot mogelijk om de leidingweerstand zo klein mogelijk te houden (bv. G*)
- Een mogelijke constructieve oplossing van het reservoir is een vat met een in hoogte verstelbare bodem of een vat waarin met behulp van het water het vrije volume veranderd kan worden. Het ijkken van het reservoir is aan te bevelen.

Een mogelijke keuze van de klep aan de in- en uitgang van de cilinder: Festo Typ MFH-5-*

Mogelijke keuze cilinder: Festo Typ DGS-40-300.

Mogelijke keuze smoorventielen aan de in- en uitgang van de cilinder: Festo Q-*

Mogelijke keuze smoorventiel uitgang reservoir:
Festo Typ GR-*