

# Ultrasoon-doppler snelheidsmetingen met de Echovar F8 van Alvar

**Citation for published version (APA):**

Heugen, R. (1994). *Ultrasoon-doppler snelheidsmetingen met de Echovar F8 van Alvar*. (DCT rapporten; Vol. 1994.069). Technische Universiteit Eindhoven.

**Document status and date:**

Gepubliceerd: 01/01/1994

**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](http://www.tue.nl/taverne)

**Take down policy**

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

[openaccess@tue.nl](mailto:openaccess@tue.nl)

providing details and we will investigate your claim.

**Ultrasoon-doppler snelheidsmetingen  
met de EchoVar F8 van Alvar**

R. Heugen  
WFW-rapport 94.069

Stageverslag  
mei 1994

**BEGELEIDERS: F. v.d. VOSSE EN M. RUTTEN**  
Faculteit Fundamentele Werktuigkunde  
Technische Universiteit Eindhoven

## Samenvatting

Deze stage is verricht in het kader van het onderzoeksproject naar het effect van de mechanische eigenschappen van bloed c.q. wand op lokaal heersende wandschuifspanningen. De stage kende een tweeledige doelstelling. Enerzijds is de werking van de ultrasoon-doppler snelheidsmeter: Echovar F8 (Alvar) onderzocht, anderzijds is de overdrachtskarakteristiek van de in de opstelling opgenomen variabele pomp (Verder: type 120-ty-20) bepaald.

In het hydraulisch gedeelte van de meetopstelling wordt water, met daarin gedispergeerde polystyreen-bolletjes, door latex-buizen rondgepompt. In dit circuit is onder andere een flowmeter en een carotis-model opgenomen. Het carotis-model bevindt zich in een bak gevuld met water. Boven de carotis wordt een probe geplaatst, waarmee ultrasoon snelheidsmetingen verricht kunnen worden. Om een goede geleiding van het ultrageluid te krijgen, dient de probe met zijn top in het water te hangen. Met de Echovar F8 zijn op die plaatsen snelheidsmetingen verricht. De ultrasoon snelheidsmeter bleek goed snelheidsprofielen over de doorsnede van de buis te meten. Bij instationaire stroming kon echter de snelheid aan de wanden niet nauwkeurig bepaald worden. De verstoringen die daar optreden, ten gevolge van de wandreflecties van het ultrageluid, konden niet verholpen worden door externe filtering.

Voor de bepaling van de overdracht van de pomp is als ingangssignaal gebruik gemaakt van de uitgangsspanning van de frequentiegenerator die de pomp aanstuurde. Als uitgangssignaal is de uitgangsspanning van de flowmeter genomen. Data-acquisitie geschiedde door gebruik te maken van het software-pakket LabVIEW. De pomp werd getest voor lage frequenties. De overdrachtsfunctie van de pomp is lineair. De pomp is, mits er een regelaar ontworpen wordt, te gebruiken tot frequenties van circa 6 Hz. Zonder regelaar is de pomp te gebruiken tot een frequentie van 0,6 Hz.

# Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Ultrasoon-geluid</b>	<b>4</b>
2.1	Doppler-principe . . . . .	4
2.2	Continuous-Wave dopplersysteem . . . . .	4
2.3	Pulse-Wave dopplersysteem . . . . .	5
2.4	Piëzo-elektrisch kristal . . . . .	8
2.5	De resolutie van de geluidsbundel . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Materiaal en methode</b>	<b>11</b>
3.1	De meetopstelling . . . . .	11
3.2	Hydraulisch gedeelte . . . . .	13
3.2.1	Snelheidsprofiel stationaire stroming . . . . .	13
3.2.2	De seeding . . . . .	14
3.3	Data-acquisitie . . . . .	14
3.3.1	Labview . . . . .	14
3.4	Echovar F8 . . . . .	15
3.4.1	Standaard uitvoering van de Echovar F8 . . . . .	15
3.4.2	Aanpassingen van de Echovar F8 . . . . .	15
3.4.3	Het meetvolume . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Metingen</b>	<b>17</b>
4.1	Stationaire stroming in carotis-model . . . . .	17
4.2	Overdrachtskarakteristiek van de pomp . . . . .	19
4.2.1	Meetresultaten . . . . .	21
4.2.2	Bespreking meetresultaten . . . . .	26
4.3	Instationaire stroming in carotis-model . . . . .	28
<b>5</b>	<b>Conclusies en Aanbevelingen</b>	<b>29</b>
5.1	Conclusies en aanbevelingen ten aanzien van de Echovar F8 . . . . .	29
5.2	Conclusies en aanbevelingen ten aanzien van de pomp . . . . .	29
<b>A</b>	<b>Gebruiksaanwijzingen voor de Echovar F8</b>	<b>32</b>
A.1	Standaard front van de Echovar F8 . . . . .	32
A.2	Eerste uitbreiding van het front . . . . .	34
A.3	Tweede uitbreiding van het front . . . . .	35

<b>B Labview</b>	<b>37</b>
B.1 Front panel . . . . .	37
B.2 Block diagram . . . . .	37
B.3 Programma overdrachtskarakteristiek van de pomp . . . . .	38
B.3.1 Front panel . . . . .	38
B.3.2 Block diagram . . . . .	38
 <b>C Kalibratie van de flowmeter</b>	 <b>41</b>
 <b>D Practicum: ultrasoon-snelheidsmeting</b>	 <b>43</b>
D.1 Inleiding . . . . .	43
D.2 De meetopstelling . . . . .	44
D.2.1 Principe van de dopplermeting. . . . .	44
D.2.2 Beschrijving meetopstelling . . . . .	44
D.3 Afleiden stromingsvergelijkingen . . . . .	46
D.4 Meten . . . . .	48
D.4.1 Kalibreren flowmeter. . . . .	48
D.4.2 Meten snelheidsprofiel in de rechte buis. . . . .	49
D.4.3 Meten snelheidsprofiel in de bulbus. . . . .	49

# Hoofdstuk 1

## Inleiding

Bij de vakgroep Fundamentele Werktuigkunde vindt het onderzoeksproject naar het effect van de mechanische eigenschappen van bloed c.q. wand op lokaal heersende wandschuifspanningen plaats. Binnen dit project wil men onder andere de invloed van de vaatwandverplaatsingen op het snelheidsprofiel meten. Hieruit onstaat de vraag naar een geschikte meetmethode. De metingen dienen verricht te worden aan een wel/niet transparante, wel/niet isotrope, distensibele buis. Bij aanvang van dit onderzoek is er de keuze uit twee meettechnieken: de ultrasoon-doppler snelheidsmeter of de laser-doppler snelheidsmeter.

Binnen deze stage is als meettechniek de ultrasoon-doppler snelheidsmeter onderzocht. Ultrasoonmetingen hebben als voordeel ten opzichte van laser-doppler snelheidsmetingen dat ze niet beïnvloed worden door de mate van transparantie van het meetobject. Alle relevante aspecten voor het meten met ultrasoon worden besproken in hoofdstuk 2. Voor dit onderzoek wordt de Echovar F8 snelheidsmeter bekeken. De metingen worden verricht aan een carotis-model, bestaande uit distensibele buizen. De meetopstelling en het daarbij behorend data-acquisitiesysteem wordt besproken in hoofdstuk 3.

Een tweede doelstelling van dit onderzoek is het vinden van een pomp die bij lage frequenties instationaire stromingen kan genereren. Het werkgebied van lage frequenties wordt ingegeven uit de doelstellingen van het onderzoeksproject, dat uitgaat van hartfrequenties (circa 1 Hz). De overdracht karakteristiek van de pomp zal bepaald worden in hoofdstuk 4, waarna de pomp samen met de Echovar F8 in hetzelfde hoofdstuk worden getest aan een carotis-model.

In bijlage A zal het gebruik van de uitgebreide Echovar F8 worden toegelicht aan de hand van de beschrijvingen van de frontpanelen. Bijlage B laat het gebruikte LabVIEW programma zien waarmee onder andere de overdracht karakteristiek van de pomp mee bepaald is. In bijlage C wordt de flowmeter gekalibreerd en in bijlage D tenslotte is een practicumhandleiding voor het 'Fysiologisch practicum voor WMT' trimester 2.2 opgenomen. Binnen dit practicum worden snelheidsmetingen aan het carotismodel verricht met behulp van de ultrasoon snelheidsmeter.

## Hoofdstuk 2

# Ultrasoon-geluid

### 2.1 Doppler-principe

In een buis heeft men een stationaire stroming van een vloeistof met daarin opgeloste deeltjes. Wanneer men nu ultrageluid met een bepaalde frequentie ( $f_z$ ) op deze buis laat vallen, zullen de bewegende deeltjes het opvallende geluid verstrooien. Het terugontvangen signaal heeft een andere frequentie dan het uitgezonden signaal. Het verschil noemt men de doppler-frequentie ( $f_d$ ). De relatie tussen ( $f_z$ ) en ( $f_d$ ) wordt gegeven door

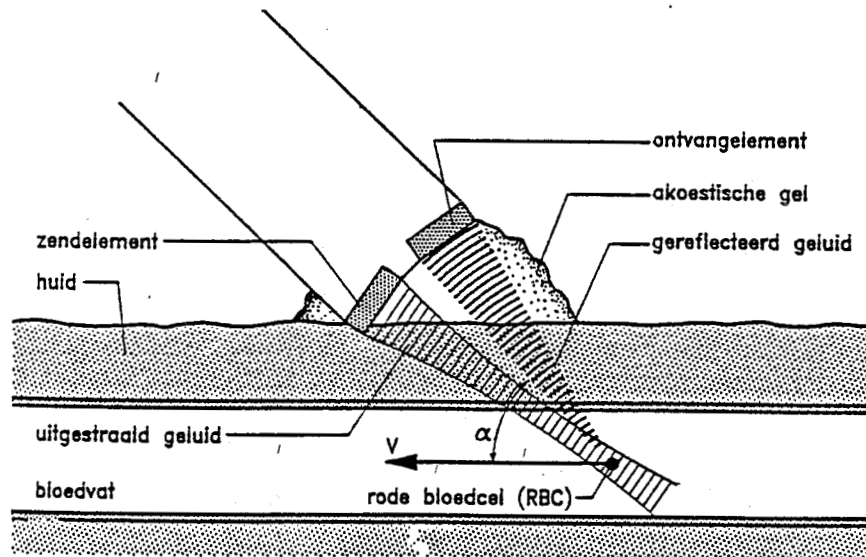
$$f_d = \frac{2 \cdot f_z \cdot v \cdot \cos \alpha}{c} \quad (2.1)$$

Hierin is  $c$  de geluidssnelheid,  $v$  de snelheid van het deeltje en  $\alpha$  de hoek waarmee het deeltje beweegt t.o.v. van de geluidsbundel (figuur 2.1). Een hoek  $\alpha$  van  $60^\circ$  garandeert de beste meetresultaten [4]. Zijn er meer deeltjes met een verschillende snelheid in de geluidsbundel, dan krijgt men een spectrum van doppler-frequenties.

### 2.2 Continuous-Wave dopplersysteem

Bij een CW dopplersysteem wordt continu ultrageluid uitgezonden. Hiertoe heeft men een aparte zend- en ontvangstransducenten nodig, die vlak bij elkaar gemonteerd zijn (figuur 2.1). De uitgezonden bundel mag niet te smal zijn, daar de buis, die men wil onderzoeken, volledig in de geluidsbundel gevangen moet kunnen worden om een juist beeld te krijgen van de snelheidsverdeling.

Door een piëzo-elektrische oscillator wordt een hoogfrequent geluidssignaal de buis ingezonden. Het door de ontvanger ontvangen hoogfrequente signaal wordt in een demodulator vergeleken met het hoogfrequente referentie signaal van de oscillator. Door modulatie ontstaat een signaal waarvan de verschilfrequentie (het te bestuderen doppler-signaal) de belangrijkste component is. Deze doppler-component is een laagfrequent (hoorbaar) signaal ( $f_d < 10$  kHz). Door het ontvangen signaal te demoduleren met een tweetal signalen met dezelfde frequentie en een onderling faseverschil van 90 graden ontstaat een complex signaal, waaruit ook de richting van de snelheid bepaald kan worden. Men is alleen geïnteresseerd in frequenties van signalen die van de bewegende deeltjes afkomstig zijn. Storende hoogfrequente signalen die bij demodulatie zijn ontstaan, ruis en storende laagfrequente vaatwandsignalen (tot ongeveer 200 à 300 Hz) kunnen worden weggefilterd met



Figuur 2.1: Meetsituatie bij een CW-systeem

een banddoorlaatfilter. Beide componenten van het complexe signaal worden op dezelfde wijze behandeld.

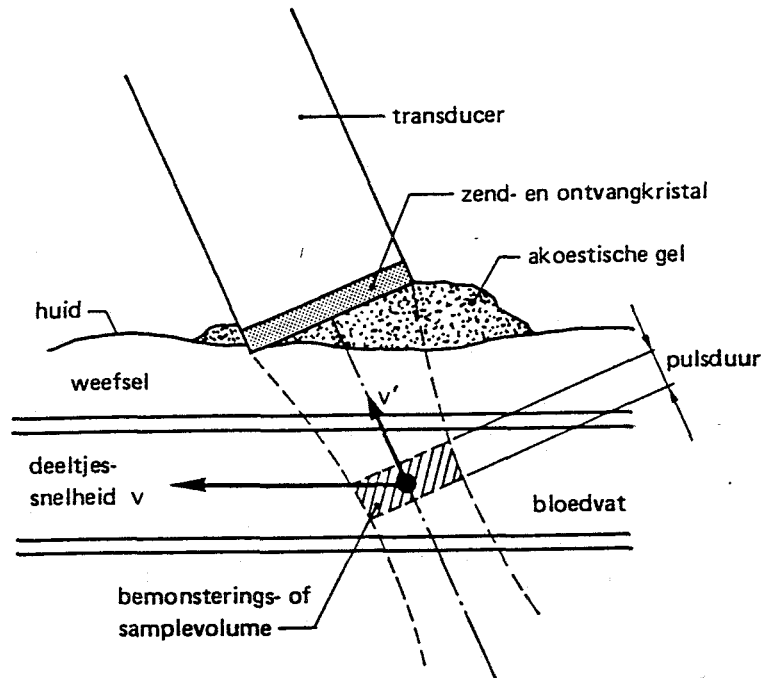
## 2.3 Pulse-Wave dopplersysteem

Wanneer men van een gepulst dopplersysteem gebruik maakt, weet men van welke diepte het verwerkte signaal komt. Hiertoe wordt een repeterend (overeenkomstig een pulsechysteem) een korte geluidspuls uitgezonden met een duur van grootte orde  $1 \mu s$  (figuur 2.2). De transducer wordt vervolgens als ontvanger gebruikt en het terugontvangen signaal wordt geanalyseerd. Bij een gepulst dopplersysteem wordt de dopplercomponent en dus de snelheid van de deeltjes in de vloeistof op een geselecteerde diepte bepaald. Dit kan gebeuren door alleen echopulsjes te analyseren die van een bepaalde (gekozen) diepte afkomstig zijn. In ieder zend/ontvangstcyclus krijgt men op deze manier een punt van het complexe doppler-signaal. Het doppler-signaal is dus bemonsterd met de pulsrepetitiefrequentie ( $f_{pr}$ ).

Signaaldiaagram 2.3 geeft een overzicht van de belangrijkste signalen voor een dergelijk systeem. De frequentie van het uitgezonden referentiesignaal (2.3.a) bedraagt 8 Mhz. De  $f_{pr}$  kan worden ingesteld op 15,6 of 31,25 kHz. Deze  $f_{pr}$  stelt een bovengrens aan de meetdiepte. Voordat een nieuw pulstreintje (2.3.b) wordt uitgezonden, dient eerst een gereflecteerd/verstrooid pulstreintje ontvangen te zijn. Zou dit niet het geval zijn, dan zouden de signalen overlappen. Er geldt voor de tijd  $t_p$  dat een pulstreintje onderweg is:

$$t_p = \frac{1}{f_{pr}} = \frac{2d_m}{c} \quad (2.2)$$



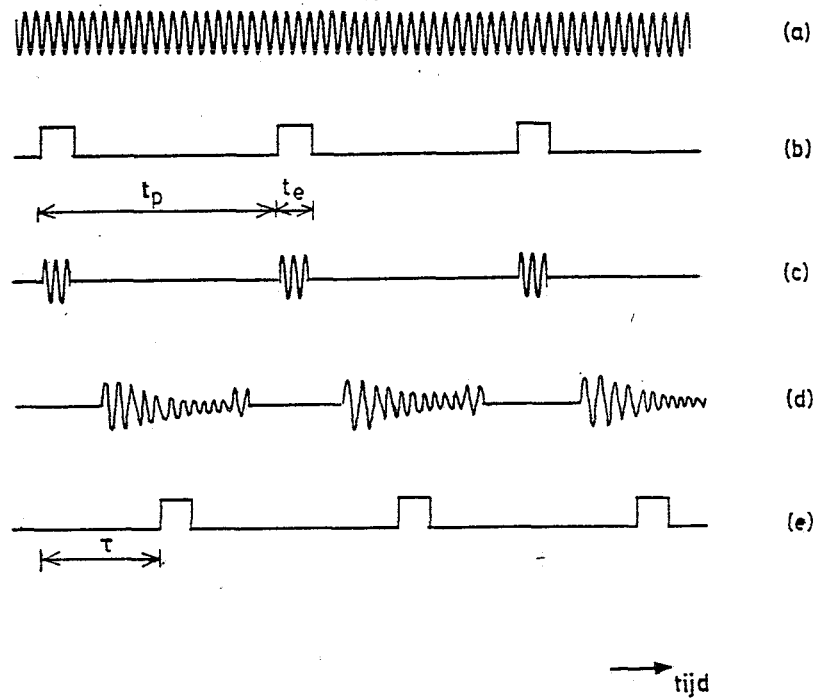


Figuur 2.2: Meetsituatie bij een gepulst dopplersysteem

Aangezien we weten dat voor water geldt  $c = 1500 \text{ m/s}$ , dan kunnen we uit formule 2.2 de maximale meetdiepten, langs de as van de ultrasone bundel, bij de  $f_{pr}$ 's afleiden:

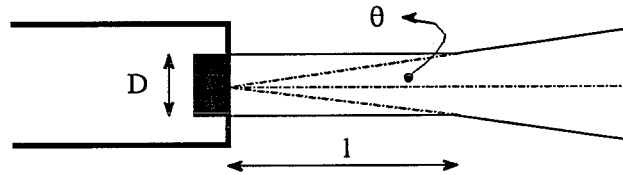
$$d_m = \frac{c}{2 \cdot f_{pr}} \quad (2.3)$$

Deze bedragen bij 15,6 kHz en 31,25 kHz, 48 respectievelijk 24 mm. Het volume-elementje waar het signaal vandaan komt, noemt men het bemonsteringsvolume. De afmeting hiervan wordt door een groot aantal factoren bepaald. De belangrijkste zijn de lokale breedte van de geluidsbundel en de duur van een geluidspulsje.



Figuur 2.3:

- a. referentiesignaal van de oscillator
- b. stuursignaal van de pulsrepetitie-generator aan het transmissie gate
- c. stuursignaal voor piëzo-elektrisch kristal
- d. elektrische uitgangssignaal van het piëzoelektrisch kristal
- e. stuursignaal van de pulsrepetitie-generator aan het range gate



Figuur 2.4: Fresnelzône

## 2.4 Piëzo-elektrisch kristal

De geluidsbron wordt gevormd door een piëzo-elektrisch kristal dat wordt aangestuurd door een oscillator. Dit keramisch materiaal ondergaat een vormverandering onder invloed van een elektrische spanning, op dezelfde wijze zet het (akoestische) drukveranderingen om in een elektrisch signaal. Dit is het zogenaamde piëzo-elektrisch effect. De vorm van de door dit kristal (diameter  $D$ ) geproduceerde ultrasone bundel is in figuur 2.4 schematisch weergegeven. De zône waarin de bundel een constante diameter heeft, noemt men de Fresnelzône. De Fraunhoferzône wordt gekenmerkt door een divergerende bundel. Als de diameter  $D$  van het kristal groot is ten opzichte van de golflengte  $\lambda$  van het door het kristal geproduceerde ultrageluid, kunnen de drukgolven in de Fresnelzône benaderd worden door vlakke golffronten. De lengte van de Fresnelzône wordt gegeven door:

$$l = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (2.4)$$

Uit de vergelijking 2.4 volgt dat een smalle bundel in combinatie met een lange Fresnelzône alleen verkregen kan worden door een kristal met een kleine diameter aan te sturen met een hoge oscillatie-frequentie. De overgang tussen Fresnel- en Fraunhoferzône is niet zo scherp als gesuggereerd wordt door figuur 2.4. De Fraunhoferzône is gedefinieerd als het gebied waar de afmetingen van het kristal verwaarloosd mogen worden, hetgeen impliceert dat in deze zône de drukgolven bolvormige golffronten zullen hebben. Voor de divergentiehoek  $\theta$  geldt:

$$\sin\theta = \frac{1.2\lambda}{D} \quad (2.5)$$

De snelheidsmetingen zullen in het algemeen plaatsvinden in de Fresnelzône van de geluidsbundel.

## 2.5 De resolutie van de geluidsbundel

Het axiaal scheidend vermogen (in de richting van de geluidsbundel) van de snelheidsmeter en de signaal-ruis verhouding wordt bepaald door de lengte van het uitgezonden

pulstreintje. Er geldt dat een langere pulstrein ( $t_e$  (figuur 2.3.b)) weliswaar een betere signaal-ruis verhouding geeft, maar dit gaat ten koste van het axiaal scheidend vermogen. De beste resultaten in termen van signaal-ruis verhouding en scheidend vermogen worden verkregen als de duur van het uitgezonden pulstreintje ( $t_e$ ) gelijk wordt aan de grootte van het range gate (figuur 2.3.e).

Hoe korter de uitgezonden geluidspuls, des te beter is de axiale resolutie, omdat dan de reflectoren dichter bij elkaar mogen liggen voordat de echo's elkaar overlappen. Voor een geluidspuls met de duur van één microseconde moeten de achter elkaar liggende reflectoren minimaal 0,75 mm van elkaar liggen. De axiale resolutie kan men verbeteren door een hogere emissiefrequentie te gebruiken. Dit wordt beperkt door de gewenste indringdiepte, die een bovengrens stelt aan de frequentie (vanwege de absorptie). Naast de axiale resolutie speelt ook de laterale resolutie (het vermogen om twee naast elkaar liggende bolletjes met verschillende snelheid van elkaar te onderscheiden) een belangrijke rol voor de kwaliteit van een ultrageluidstelsel. De laterale resolutie wordt bepaald door de breedte van de geluidsbundel.

Wanneer een geluidspuls wordt uitgezonden zullen de diverse structuren in de geluidsbundel echo's veroorzaken. Naarmate de structuren verder weg liggen van de transducent zal enerzijds de looptijd toenemen, anderzijds zal de amplitude afnemen als gevolg van verzwakking (absorptie, gedeeltelijke transmissie, verstrooiing, divergentie van de bundel). De geleidelijke verzwakking is zowel een voordeel als een nadeel. Doordat de echo-amplitudes afnemen tot beneden het detecteerbare niveau, kan na enige tijd opnieuw een geluidspuls worden uitgezonden zonder dat eerder uitgezonden geluidspulsen tot verwarrende echo's leiden. Anderzijds limiteert de verzwakking de penetratiediepte. Zoals reeds eerder vermeld kan men de penetratiediepte vergroten door een lagere emissiefrequentie te kiezen. De  $f_{pr}$  moet men dan dien overeenkomstig aanpassen.

Mate van reflectie wordt bepaald door:

- Verschil in akoestische impedantie:

De akoestische impedantie is een materiaaleigenschap die gelijk is aan de ratio van de bolletjessnelheid en de drukvariatie. Ieder medium heeft zijn eigen akoestische impedantie ( $Z$ ). Dit komt tot uiting in de relatie  $Z = \rho \cdot c$ , met  $\rho$  als de dichtheid van het medium. Wat er gebeurt met een geluidsgolf in het vlak tussen media met verschillende akoestische impedantie is in hoge mate afhankelijk van de afmetingen van het vlak ten opzichte van de golflengte ( $\nu = \frac{c}{f_e}$ ) van het ultrageluid. In het geval dat de afmetingen van de reflector/vlak vele malen groter zijn dan de golflengte van het ultrageluid, vindt er een gedeeltelijke reflectie plaats, waarbij de hoek van inval gelijk de hoek van reflectie is.

- De afmetingen van de verstrooier:

Het gedrag van een geluidsgolf aan een akoestische inhomogeniteit met afmetingen die aanzienlijk kleiner zijn dan de gebruikte golflengte is volledig anders. Het bolletje kan onder invloed van de geluidsgolf in zijn geheel gaan meetrillen, waardoor de opvallende geluidsgolf naar alle kanten wordt verstrooid. Slechts een klein gedeelte van het invallende geluid zal dan door verstrooiing de bron/ontvanger bereiken. Naarmate de afmetingen van het bolletje groter worden is er minder sprake van

- verstrooiing en meer van reflectie.
- De intensiteit van de zich voortplantende geluidsgolf:  
Wanneer ultrageluid zich door een medium voortplant neemt de intensiteit ervan geleidelijk af. Hiervoor zijn verschillende redenen te geven; de divergentie van de geluidsbundel, verstrooiing en gedeeltelijke reflectie van ultrageluid bij akoestische overgangen. De belangrijkste reden voor de afname van de geluidsintensiteit als functie van de afstand tot de transducent is echter de absorptie, waarbij geluidsenergie verloren gaat als warmte. De mate van absorptie is afhankelijk van de afgelegde afstand, de frequentie en het soort medium. Een eventuele luchtlaag tussen de transducent en het buisoppervlak zal transmissie van ultrageluid nagenoeg verhinderen. Om dit te vermijden dient tussen de transducent en de buis een waterlaag aanwezig te zijn.

## Hoofdstuk 3

# Materiaal en methode

In dit hoofdstuk wordt de meetopstelling en de daarbij behorende componenten afzonderlijk besproken. Het hydraulisch gedeelte wordt nader toegelicht. De kalibratie van de flowmeter is terug te vinden in bijlage C. Verder komen in dit hoofdstuk de specifieke eigenschappen van de Echovar F8 en de aanpassingen aan bod.

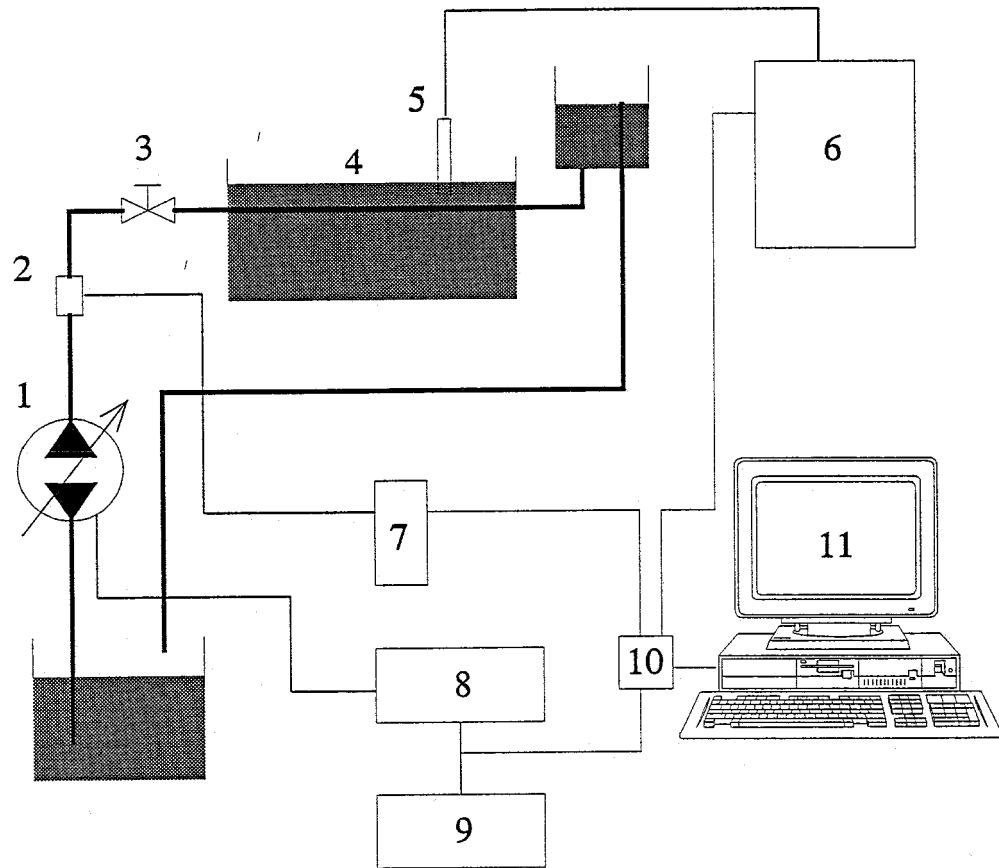
### 3.1 De meetopstelling

De meetopstelling is gebouwd om enerzijds ultrasoonmetingen te kunnen verrichten aan een distensibel carotis-model en anderzijds om de overdrachtsfunctie van de pomp te kunnen bepalen. Het hydraulisch gedeelte ziet er, wanneer we de stromingsrichting van het water aanhouden, als volgt uit (figuur 3.1). Uit het waterreservoir wordt water omhooggepompt (3.1.1). Door latex-buizen loopt het water via de flowmeter en een afsluitkraan het carotis-model binnen. De carotis is opgehangen in een grote bak (3.1.4). Deze bak is zodanig met water gevuld dat de waterspiegel 1,5 cm boven de buizen van het carotis-model ligt. De waterlaag boven de carotis zorgt voor een goede geleiding van het ultrageluid bij de ultrasoonmetingen (3.1.5). Vervolgens stroomt het water een constant head tank binnen. Vanuit deze tank is er een terugstroom naar het waterreservoir.

De variabele pomp (3.1.1) kan geregeld worden met de toerentalregelaar (3.1.8). Aan deze toerentalregelaar is een frequentiegenerator (3.1.9) gekoppeld die het mogelijk maakt om verschillende instationaire stromingen te genereren. Voor de bepaling van de overdracht van de pomp wordt als ingangssignaal de frequentiegenerator en als uitgangssignaal de versterker van de flowmeter (3.1.7) genomen. Deze signalen worden via een signaalkastje (3.1.10) de computer ingeleid. De uitlezing van de Echovar geschiedt ook met de computer.

De belangrijkste apparatuur die gebruikt is nogmaals op een rijtje gezet (figuur 3.1):

1. Pomp: Verder, type 120-ty-20.
2. Electromagnetische flowmeter (Skalar, EC6, 0-90054, 500 ml/min). De opnemers hebben een bereik van -2000 tot 2000 ml/min.
3. Afsluitkraan.
4. Carotis-model.



Figuur 3.1: De meetopstelling

5. Single probe: Alvar, type C8M-15.
6. Ultrasoon-doppler snelheidsmeter (Alvar: Echovar F8).
7. Versterker van de flowmeter: Skalar, type MDL 501.
8. Toerentalregelaar van de pomp: Verder, type 120-ty-20.
9. Frequentiegenerator: Philips, type 5132.
10. Achtkanaals signaalkastje.
11. PC-AT 486, 8 Mb intern geheugen met interfacekaart: National Instruments, type AT-MIO-16.

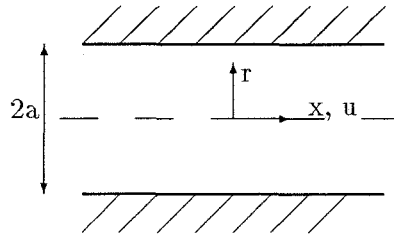
## 3.2 Hydraulisch gedeelte

### 3.2.1 Snelheidsprofiel stationaire stroming

Wanneer we de flow in de buis meten en een snelheidsprofiel met de ultrasoon snelheidsmeter, willen we een uitspraak kunnen doen over de grootte van de gemeten snelheid. Om hier een uitdrukking voor te vinden gaan we uit van een Navier-Stokes vergelijking voor Newtonse media:

$$\frac{\partial \underline{v}}{\partial t} + (\underline{v} \cdot \nabla) \underline{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \underline{v} \quad (3.1)$$

Wanneer we vergelijking 3.1 in cilindercoördinaten schrijven en de volgende randvoorwaarden invullen:  $u = u(r)$ ,  $v_r = 0$  en  $p = p(x)$ . Dan gaat deze vergelijking over in



$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (3.2)$$

met  $u(r)|_{r=a} = 0$  en  $\frac{\partial u}{\partial r}|_{r=0} = 0$  en  $\eta = \nu \rho$  levert dit voor de snelheid  $u$ :

$$u(r) = -\frac{1}{4\eta} \frac{\partial p}{\partial x} (a^2 - r^2) \quad (3.3)$$

Uit deze vergelijking blijkt dat het snelheidsprofiel gevormd wordt door een parabool over de doorsnede van de buis. De flow  $\Phi$  is als volgt gedefinieerd

$$\Phi = \int_0^a u 2\pi r dr = -\frac{\pi}{8\eta} \frac{\partial p}{\partial x} a^2 \quad (3.4)$$

$$\Phi = u_m \pi a^2 \quad (3.5)$$



Een uitdrukking voor  $u(r)$  als functie van  $u_m$  is af te leiden door vergelijking 3.5 in 3.3 in te vullen.

$$u(r) = 2u_m \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right) \quad (3.6)$$

Zo kan vanuit de flow de maximale snelheid in de buis berekend worden door substitutie van vergelijking 3.5 in vergelijking 3.6.

### 3.2.2 De seeding

Voor het verkrijgen van een goed signaal bij ultrasoon metingen moeten er deeltjes in de vloeistof aanwezig zijn die het opvallend geluid weerkaatsen. De belangrijkste eisen die aan de seeding worden gesteld, kunnen als volgt worden samengevat:

- Aangezien de snelheidsmeter de snelheid meet van de seedingsdeeltjes dienen deze deeltjes de stroming zo goed mogelijk te kunnen volgen, hetgeen betekent dat hun dichtheid in dezelfde grootte orde moet liggen als de dichtheid van het stromingsmedium (water).
- Hun diameter dient vele malen kleiner te zijn dan de diameter van het stromingskanaal.
- De deeltjes dienen het ultrageluid zo goed mogelijk te verstrooien. Het verstrooiend vermogen van een deeltje wordt bepaald door de verschillen in dichtheid en akoestische impedantie tussen het deeltje en het stromend medium.
- Het seedingsmedium moet goed kunnen worden gemengd met het stromend medium teneinde een uniforme deeltjesdichtheid te krijgen.
- Het seedingsmedium dient in de tijd zijn materiaaleigenschappen te behouden (onvergankelijk).

Vanuit bovenstaande eisen werd gekozen voor polystyreenbolletjes. De aangeleverde vloeistof bevatte polystyreenbolletjes variërend in diameter van 2 tot 20  $\mu\text{m}$ .

## 3.3 Data-acquisitie

### 3.3.1 Labview

De data-acquisitie gebeurt m.b.v. het softwarepakket LabVIEW 3.0. LabVIEW is een object-georiënteerde programmeertaal. Het programmeren geschiedt niet door het schrijven van listings maar door het tekenen van netwerken. Programma's worden gemaakt door het plaatsen van programmablokken in het *block diagram* en deze blokdiagrammen met elkaar te verbinden door draden. De informatie-uitwisseling met de gebruiker tijdens de looptijd van het programma vindt plaats via het *front panel*. Dit kan onder andere opgebouwd zijn uit verscheidene invoer-velden, schakelaars en grafieken. Een verdere toelichting over het gebruik van LabVIEW en het programma dat geschreven is om de overdrachtskarakteristiek van de pomp te bepalen staat in bijlage B.

## 3.4 Echovar F8

### 3.4.1 Standaard uitvoering van de Echovar F8

Aangezien de samplingsfrequentie gelijk is aan de  $f_{pr}$ , zou, op grond van het samplings-theorema van Shannon, mogen worden verondersteld dat de maximale detecteerbare dopplerfrequentie 7,3 resp. 15,6 kHz mag bedragen (paragraaf 2.3). Maar in de praktijk zal de  $f_{pr}$  drie of viermaal zo groot moeten zijn als de dopplerfrequentie [10]. Dit betekent dat de maximaal detecteerbare snelheid bij  $f_{pr}$  15,6 kHz 47 cm/s bedraagt en bij 31,25 kHz 94 cm/s. De kleinst detecteerbare snelheid wordt bepaald door de kantelfrequentie van het hoogdoorlaatfilter dat dient voor de onderdrukking voor de laagfrequente, hoog amplitude signalen afkomstig van de buiswandverplaatsingen ('bande paroi'). Kantelfrequenties van 300 en 600 Hz (-6 dB) geven kleinst detecteerbare snelheden van 2 resp. 4 cm/s. Het stationaire meetbereik loopt van 300 tot ongeveer 6,5 kHz.

De kantelfrequentie van het laagdoorlaatfilter, dat dient voor de onderdrukking van de samplingsfrequentie, wordt automatisch ingesteld met de instelling van de  $f_{pr}$ . Bij de  $f_{pr}$  van 15,6 kHz hoort een kantelfrequentie van 15 kHz en bij die van 31,25 kHz een van 30 kHz (-6 dB). Hoog- en laagdoorlaatfiltervormen samen het banddoorlaatfilter. De uitgang van een van deze bandfilters is via een audioversterker aangesloten op een luidspreker.

Voor de bepaling van de frequenties van het gebandfilterde signaal worden nuldoorgangtellers (ndt's) gebruikt. In de puls/spanning-omzetter (pso) worden de door de ndt's gegenereerde pulsjes omgezet in een gelijkspanning welke evenredig is met het aantal nuldoorgangen per eenheid van tijd. Het teken van de frequentieverschuiving ofwel de richting van de snelheid kan worden bepaald uit het gedemoduleerde en gefilterde uitgangssignaal van de ontvangstversterker. De maximale fluktuatie-frequentie in de doppler frequentie, die met het Alvar systeem kan worden gevolgd wordt in eerste instantie bepaald door de puls/spanning-omzetter. De maximaal detecteerbare fluctuatie-frequentie in de dopplerfrequentie bedraagt 55 Hz.

### 3.4.2 Aanpassingen van de Echovar F8

Op de kast zijn mogelijkheden gemaakt om te kiezen voor externe filtering. Doch bij het aansluiten van twee externe banddoorlaatfilters bleken de meeteigenschappen van het systeem zich niet te verbeteren.

Aangezien de interne pso beperkingen oplegt aan het stationaire meetbereik van de snelheidsmeter en het dynamisch meetbereik van het systeem is er een externe pso ingebouwd. Hiermee kan het dynamisch meetbereik worden ingesteld op 50, 100 of 300 Hz. De bovengrens van het stationaire meetbereik bedraagt nu 10 kHz. De vergroting van het dynamisch meetbereik houdt echter wel een verhoging van het stationaire meetbereik in. De kleinst detecteerbare frequentieverschuiving bedraagt voor de standen 50, 100 en 300 Hz. van het dynamisch meetbereik resp. 100, 250 en 1000 Hz.

### 3.4.3 Het meetvolume

Op het frontplaatje wordt de meetdiepte ('profondeur') door middel van een digitaal display uitgelezen. Hierbij dient te worden opgemerkt dat deze profoundeur de tijdspanne

aangeeft tussen het moment van emissie van een pulstreintje en het moment dat het range gate opengaat (zie figuur 2.4). Deze tijdsduur wordt aangegeven in eenheden van  $0,5 \mu s$ . De instelling geschiedt m.b.v. de voetpedalen. Bij elke  $f_{pr}$  geven LED's de bij die  $f_{pr}$  behorende maximale meetdiepte aan ('profondeur maxi'), 32 of 64 sec. De lengte van het meetvolume langs de as van de ultrasone bundel (largeur) kan worden gevarieerd door de tijd van de transmissie gate openstaat te variëren of door de lengte van het uitgezonden pulstreintje te veranderen. De largeur wordt op dezelfde wijze uitgelezen en ingesteld als de profondeur en kan eveneens worden gevarieerd met eenheden van  $0,5 \mu sec$  in de radiale richting van het stromingskanaal.

De lengte van de uitgezonden pulstreintjes ('duree emission') kan worden ingesteld op 0.5, 1 of 2  $\mu sec$  voor beide waarden van  $f_{pr}$ , hetgeen correspondeert met 4, 8 of 16 oscillaties van het stuursignaal van 8 MHz.

## Hoofdstuk 4

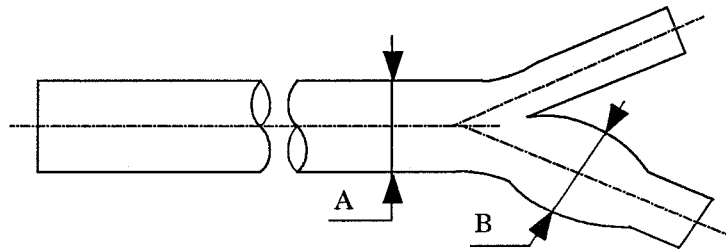
# Metingen

In dit hoofdstuk worden er eerst snelheidsmetingen bij een stationaire stroming op twee plaatsen in het carotis-model beschreven. Vervolgens wordt de overdrachtskarakteristiek van de pomp bepaald. Tot slot wordt een snelheidsmeting bij een instationaire stroming in een rechte buis besproken.

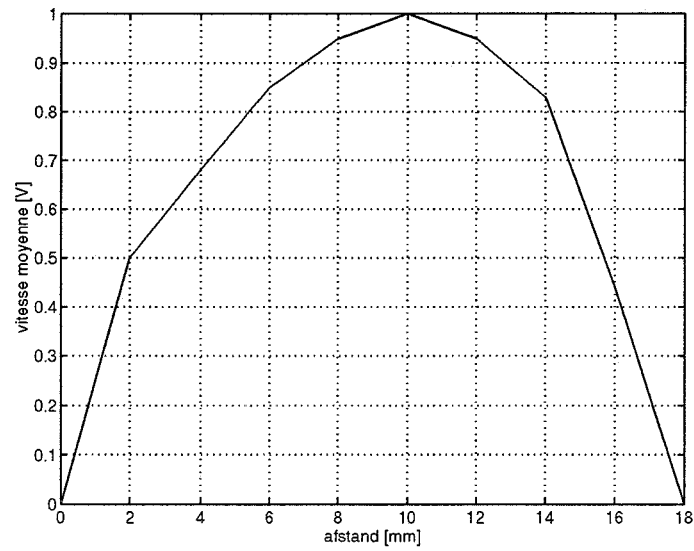
### 4.1 Stationaire stroming in carotis-model

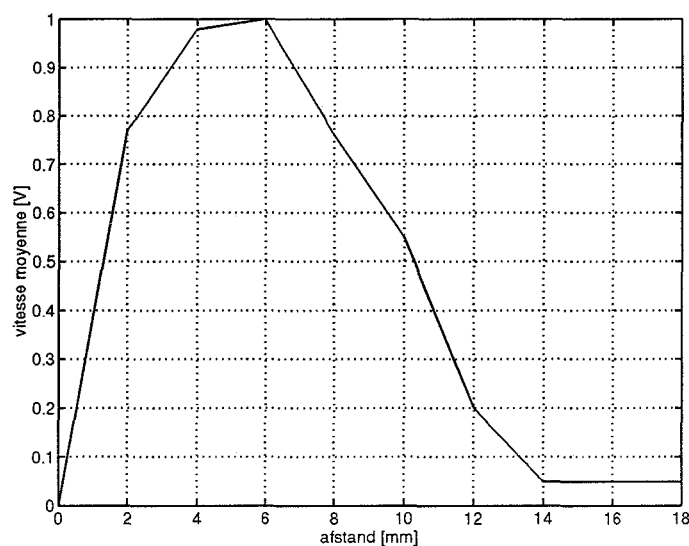
Naast de waterbak (zie figuur 3.1) wordt een statief geplaatst met daarop een arm met klem. In deze klem wordt de probe van de Alvar bevestigd. De probe wordt in een zodanige verticale positie boven de latex-buis gedraaid dat de wanden van de buis een goede reflectie geven bij een CW-spectrum (ongeveer 1 cm boven de buis). De range gate wordt in het midden van de twee wandreflecties geplaatst. De probe wordt transversaal, met stappen van 2 mm, over de buis verplaatst (van boven naar beneden in figuur 4.1). Bij iedere positie van de probe wordt met het PW-systeem de gemiddelde snelheid van de bolletjes in het water gemeten. Deze metingen vinden op twee plaatsen in het carotis-model plaats.

Bij de eerste meting (figuur 4.2) meten we in een rechte buis. Het gemeten snelheidsprofiel stemt overeen met de theoretische verwachting: een parabolisch snelheidsprofiel. De tweede meting (figuur 4.3) wordt in de bulbus verricht. Het snelheidsprofiel geeft een ander beeld te gevolge van de stromingsverdeler en de verwijding in de buis. Er treedt een secundair stromingsveld op in de verwijding. Hierdoor ontstaat aan de binnenzijde van de buis (de kant van de stromingsverdeler) een grote snelheidsgradient, terwijl aan de buitenzijde de snelheid plaatselijk nul kan zijn (figuur 4.3).



Figuur 4.1: Meetplaatsen in het carotis-model

Figuur 4.2: Snelheidsprofiel transversaal A ( $\Phi = 700 \text{ ml/min}$ )



Figuur 4.3: Snelheidsprofiel transversaal B ( $\Phi = 700 \text{ ml/min}$ )

## 4.2 Overdrachtskarakteristiek van de pomp

Het frequentiebereik van het werkgebied van de pomp wordt gerelateerd aan het bereik van de hartfrequentie. Daarbij een standaardfrequentie nemend van een normale hartslag van 60 slagen/min,  $f = 1 \text{ Hz}$ . De gebruikte parameters in het carotis-model worden zoveel mogelijk aan het menselijk lichaam ontleend (tabel 4.1).

Hetingangssignaal wordt geleverd door een frequentiegenerator. Ieder gewenst signaal kan zo aan de pomp opgelegd worden. De volgende meetcondities bepalen het ingangssignaal:

- De pomp heeft een drempelniveau van 0,2 V.
- De Womersley-parameter  $\alpha$  is 10 in de aorta (tabel 4.1).  $\alpha$  varieert met de frequentie van het ingangssignaal.

$$\alpha = R \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} \quad (4.1)$$

Met  $R$  de straal van de buis,  $\omega$  de hoekfrequentie en  $\nu$  de kinematische viscositeit. Voor de laagst mogelijke frequentie  $f_{min} = 0,04 \text{ Hz}$ , die we met de frequentiegenerator kunnen genereren, vinden we  $\alpha = 3,6$  en voor  $f_{max} = 7 \text{ Hz}$   $\alpha = 47,2$ . De stroming is als laminair op te vatten.

	$R \text{ (m)}$	$u \text{ (ms}^{-1}\text{)}$	$\nu \text{ (m}^2\text{s}^{-1}\text{)}$	$Re_{max}$	$\alpha$
Aorta	$10^{-2}$	0,5	$4 \cdot 10^{-6}$	1000	10
Model	$9 \cdot 10^{-3}$		$1 \cdot 10^{-6}$	1000	

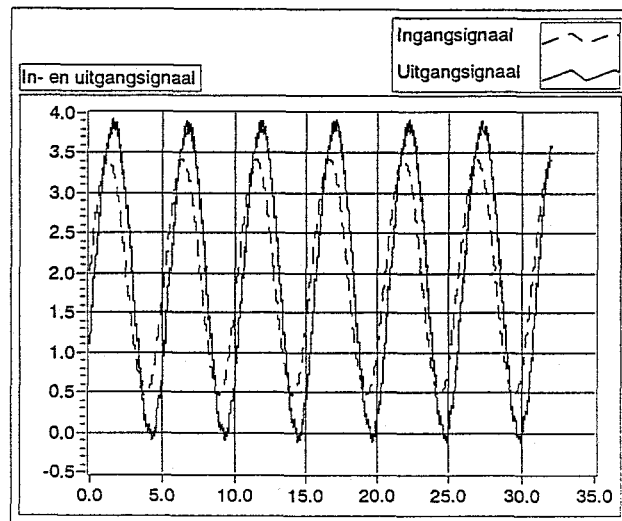
Tabel 4.1: parameters carotis-model [7]

- Uit tabel 4.1 volgt  $\alpha=10$  en  $Re=1000$  in de aorta. Aangezien  $\alpha$  met de frequentie verandert en we op zoek zijn naar het meetbereik van de pomp stellen we  $Re=1000$  als bovengrens. Een ondergrens van het Reynolds-getal wordt gegeven door de aanstuurdrempel van de pomp. Een veilige marge is  $Re_{min}=200$ . Uit paragraaf 3.2.1 volgt dan voor de flow  $\Phi$ :

$$Re_{min}=200: \quad \Phi=222 \text{ ml/min}$$

$$Re_{max}=1000: \quad \Phi=1111 \text{ ml/min}$$

- Met behulp van het software-programma LabVIEW wordt een programma geschreven waarmee de overdrachtskarakteristiek van de pomp bepaald wordt (bijlage B). De gebruikte interfacekaart vertoont een verwaarloosbare off-set spanning (dient niet gekalibreerd te worden). De kalibratie van de flow-meter wordt in het programma opgenomen. Het programma berekent aan de hand van het ingangssignaal (uitgangsspanning van de frequentiegenerator) en het uitgangssignaal (uitgangsspanning van de flowmeter) de overdracht bij iedere frequentie (figuur 3.1).

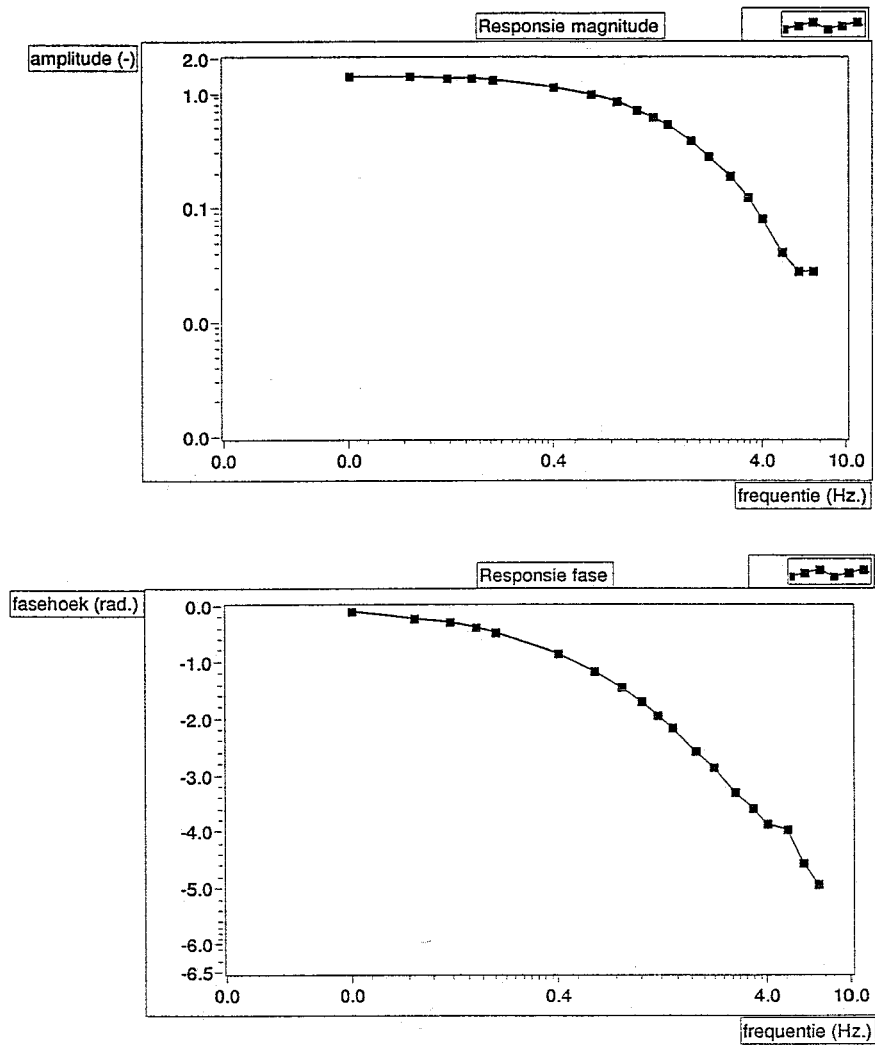


Figuur 4.4: Verticale as: spanning [V.]. Horizontale as: tijd [sec.]

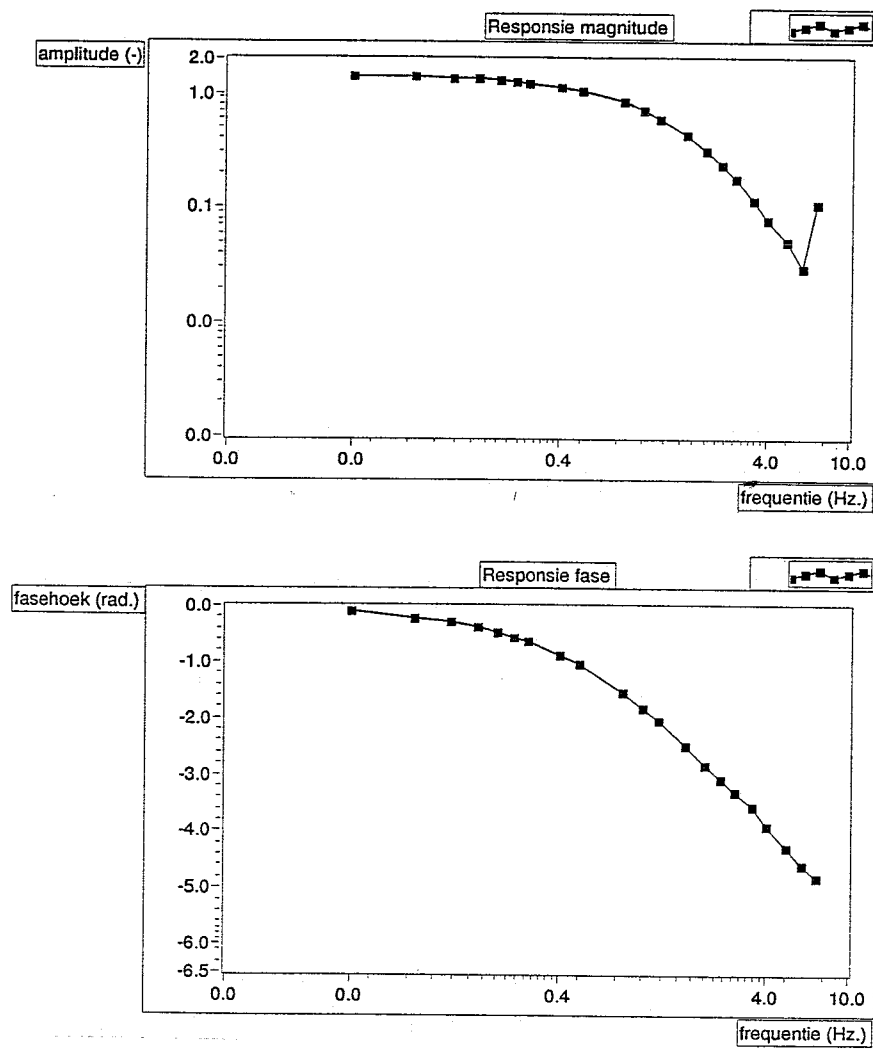
#### 4.2.1 Meetresultaten

Figuur 4.4 laat de signalen zien die de computer van het meetkastje ontvangt (verticale as: spanning [V], horizontale as: tijd [sec]). Het ingangssignaal is een sinusoïde met een frequentie van 0,2 Hz en een offset van 1,9 V en laat een amplitude van 1,5 V zien. Het uitgangssignaal heeft een versterking en een faseverdraaiing ondergaan. Wanneer we deze meting voor verschillende frequenties uitvoeren kunnen we een beeld krijgen van de amplituderesponsie en de fasekarakteristiek van de pomp. De amplituderesponsie is niet geschaald op 1. De volgende grafieken geven bovenstaande karakteristieken voor ingangssignalen met verschillende amplitudes.

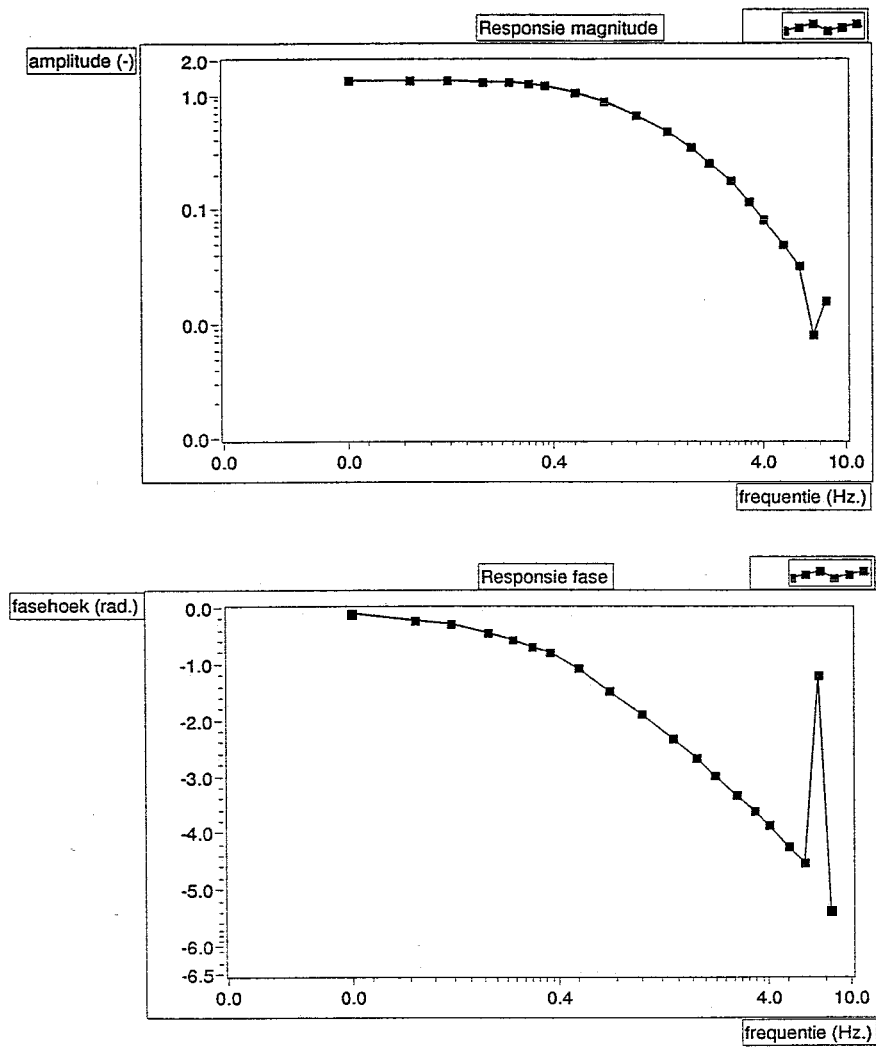




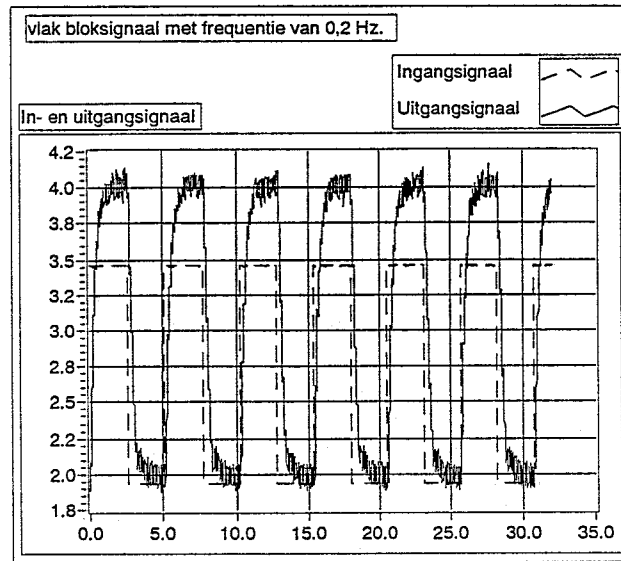
Figuur 4.5: Ingangssignaal is een sinusoïde met een off-setspanning van 1,9 V ( $\Phi_{gem} = 498$  ml/min) en een amplitude van 0,5 V ( $\Phi_{max} = 550$  ml/min).



Figuur 4.6: Ingangssignaal is een sinusoïde met een off-setspanning van 1,9 V ( $\Phi_{gem} = 498$  ml/min) en een amplitude van 1 V ( $\Phi_{max} = 642$  ml/min).



Figuur 4.7: Ingangssignaal is een sinusöide met een off-setspanning van 1,9 V ( $\Phi_{gem} = 498$  ml/min) en een amplitude van 1,5 V ( $\Phi_{max} = 833$  ml/min).



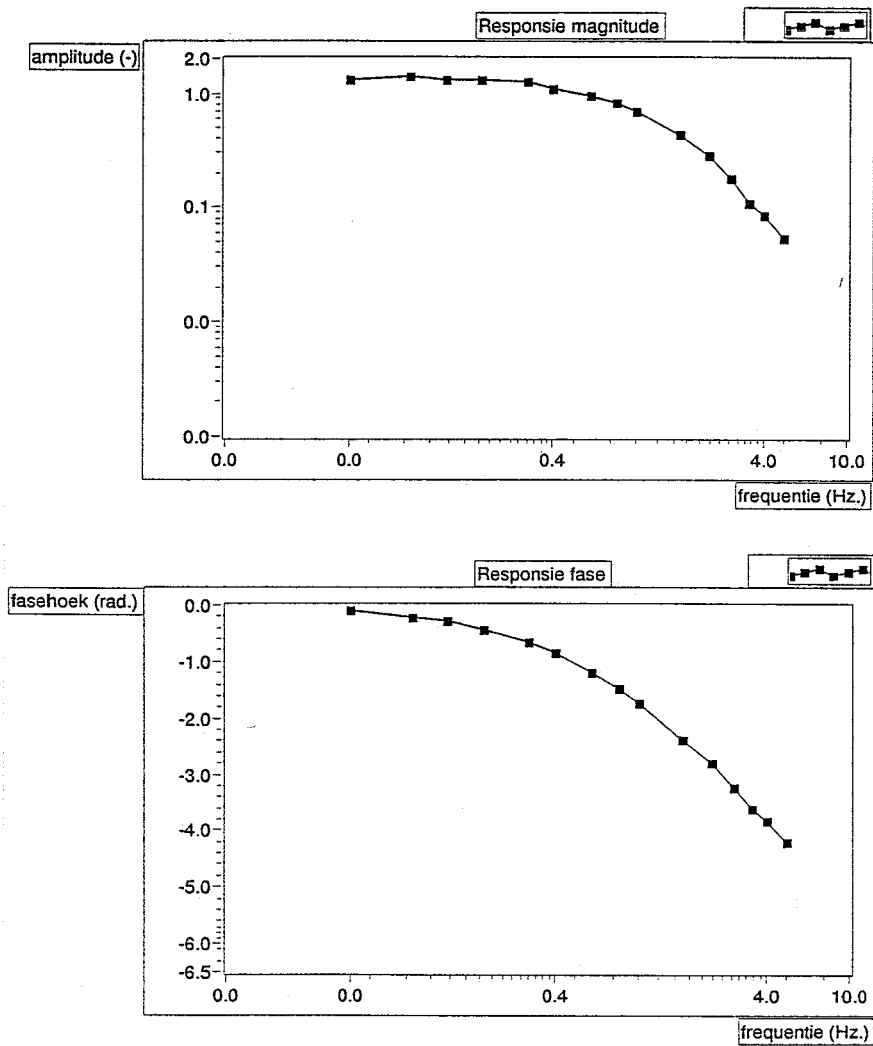
Figuur 4.8: Vlak bloksignaal  $f=0,2$  Hz. Verticale as: spanning [V.]. Horizontale as: tijd [sec.]

Voorgaande drie figuren lieten de respons zien op een sinusvormig ingangssignaal met verschillende amplitude. Als ingangssignaal wordt nu een vlakke blokgolf genomen (figuur 4.8) met een frequentie van 0,2 Hz., een offset van 1,9 V en een amplitude van 1,5 V. De overdrachtskarakteristiek aan de hand van dit signaal volgt uit figuur 4.9.

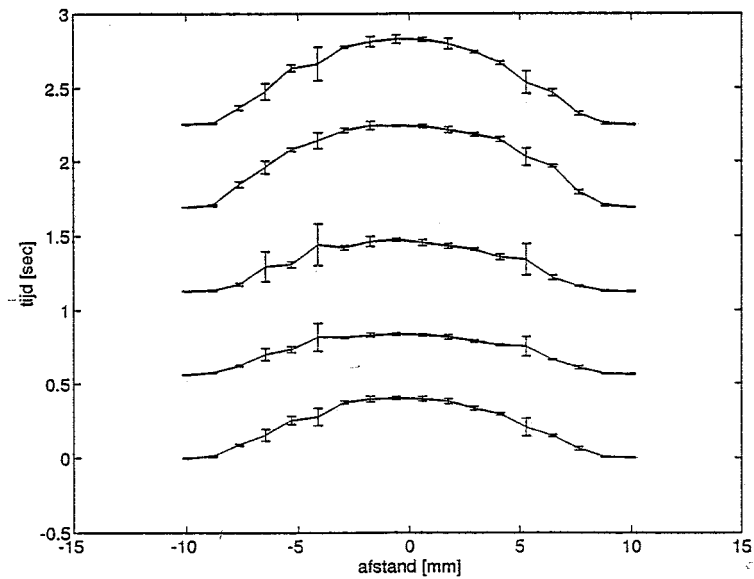
### 4.2.2 Bespreking meetresultaten

Ongeacht het aangebodeningangssignaal laat de pomp tot 6 Hz eenzelfde overdracht zien (vergelijk figuur 4.6 met figuur 4.9). Deze overdracht is gelijk aan de statische versterking voor lage frequenties tot 0,6 Hz. Boven deze frequentie neemt de amplitudeversterking af. De grafiek die ontstaat duidt op een lineair systeem. De overdrachtsfunctie is van een hogere orde systeem, omdat in de gemeten overdracht onder andere de flowmeter, het motortje van de pomp en de massastraagheid van de vloeistof tot meerdere tijdsconstanten in de overdrachtsfunctie leiden. Bij een frequenties  $>6$  Hz volgt de pomp niet meer het opgelegdeingangssignaal. De signaal-ruisverhouding wordt dan zo groot, dat de overdrachtsfunctie onstaat uit een fouriertransformatie met ruis alsingangssignaal (figuur 4.9).

De fasehoek geeft voor alle gemeten signalen een fase-achterstand te zien. Het uitgangssignaal loopt van 0 bij  $f=0,04$  Hz tot een faseachterstand van  $2\pi$  bij  $f >6$  Hz. De autospectrale energiedichtheid van het uitgangssignaal ligt binnen het spectrum van hetingangssignaal. Hieruit volgt dat we uit de superpositie vaningangssignalen ieder willekeurig uitgangssignaal kunnen maken.



Figuur 4.9: Ingangssignaal is een vlakke blokgolf met een off-setspanning van 1,9 V ( $\Phi_{min} = 498$  ml/min) en een amplitude van 1,5 V ( $\Phi_{max} = 833$  ml/min).



Figuur 4.10: Snelheidsprofiel gedurende één periode. De standaarddeviatie is op het snelheidsprofiel getekend.

### 4.3 Instationaire stroming in carotis-model

In de distensibele buis wordt een sinusvormige flow genereerd ( $\Phi_{gem}=560$  ml/min en  $\Phi_{max}=860$  ml/min,  $\alpha = 11$ ) met  $f=0,4$  Hz. De metingen met de Echovar F8 worden uitgelezen met behulp van LabVIEW. Er wordt gemeten op positie A zoals aangegeven staat in figuur 4.1. De probe wordt met stappen van 1 mm transversaal over de buis verplaatst. Iedere positie wordt gedurende 2 perioden 4 keer gemeten. Uit deze metingen wordt het gemiddelde en de standaarddeviatie berekend (figuur 4.10). De buisdiameter bedraagt 16 mm. De metingen blijken redelijk nauwkeurig te zijn in het midden van de buis (van 5 tot 12 mm). De standaarddeviatie bedraagt daar maximaal 0,04 V. Buiten dit gebied verlopen de metingen met een grotere onnauwkeurigheid, met een maximaal gemeten standaarddeviatie van 0,16 V. De maximale gemeten gemiddelde waarde van het dopplersignaal bedraagt 0,63 V. Links en rechts is in figuur 4.10 een verstoring van eenzelfde orde grootte te zien. Deze verstoring lijkt symmetrisch en zou te wijten kunnen zijn aan de reflecties van de wanden van de buis. Aan de linkerzijde langs de wand is een grote meetfout te zien, die opgetreden kan zijn tijdens het meten.

## Hoofdstuk 5

# Conclusies en Aanbevelingen

### 5.1 Conclusies en aanbevelingen ten aanzien van de Echo- var F8

Tijdens metingen met de Echovar F8 is gebleken dat:

- Externe filtering niet het bandfilter verbeterde ten opzichte van interne filtering.
- Op onverklaarbare wijze de offset-spanning om 0,2 V zakte.
- De gemeten snelheidswaarden zijn dicht langs de wand onbetrouwbaar vanwege de interne banddoorlaatfilters.
- De gebruikte seeding (polystyreen-bolletjes) voldeed aan de gestelde eisen en leverde goede snelheidsprofielen op.
- Door het puls-wave single gate systeem het alleen maar mogelijk is op één positie de snelheid in de buis te meten.

Externe filtering zou men kun verbeteren door een versterker tussen de meetkast en de externe filters te plaatsen. Het ultrasoon-doppler systeem in de vorm van de Echovar F8 voldoet voor eenvoudige snelheidsprofielmetingen in een buis. Maar om precieze snelheidsmetingen te verrichten, kent het systeem te veel nadelen. Men zou de laser-doppler en de ultrasoon snelheidsmeter kunnen vergelijken voor dezelfde experimenten. Een betere afweging welk systeem binnen dit onderzoeksproject en op welke manier bruikbaar is zou dan gemaakt kunnen worden.

### 5.2 Conclusies en aanbevelingen ten aanzien van de pomp

De pomp heeft een lineaire overdrachtsfunctie tot een frequentie van circa 6 Hz. Dit wil zeggen dat het uitgangssignaal een faseverdraaiing en een amplitudeversterking vertoont ten op zichte van het ingangssignaal, maar wel dezelfde frequentie heeft. Het lineair gedrag van de pomp blijkt uit de gedane metingen, waaruit een grafiek voor de overdrachtsfunctie ontstaat die identiek blijft voor verschillende aangeboden ingangssignalen.

De overdracht van de pomp is ongeveer 1 tot  $f = 0,6$  Hz. De pomp is in dit gebied zonder regelaar te gebruiken. Men zou een regelaar kunnen ontwerpen, die de pomp voor



hogere frequenties geschikt maakt. Uit de metingen blijkt dat een frequentie van circa 6 Hz mogelijk moet kunnen zijn. Deze grenswaarde kan met een goede regelaar bepaald worden.

Als data-acquisitie systeem blijkt LabVIEW uitermate geschikt te zijn om zowel systemen aan te sturen als uit te lezen. Het is mogelijk om in deze programmataal in korte tijd te leren programmeren. Het *front panel* kan eenvoudig en overzichtelijk van vorm worden gemaakt, waardoor iemand zonder kennis van deze programmeertaal toch metingen kan uitvoeren en de resultaten kan interpreteren. De gemeten data kunnen meteen verwerkt worden.

# Bibliografie

- [1] Aelen, F.W.L.: *Schatting van stromingsprofielen in de carotis*.  
Afstudeerverslag, vakgroep Technische Natuurkunde, 1993.
- [2] Fung, Y.C.: *Biodynamics Circulation*.  
Springer-Verlag New York Inc., U.S.A. 1984.
- [3] Brounts L.: *Literatuuronderzoek naar de principes en toepassingsmogelijkheden van de ultrasoon-doppler snelheidsmeettechniek*.  
Interafdelingsproject atherosclerose, Werktuigbouwkunde, 1983.
- [4] Brounts L.: *De Echovar F8 van Alvar, een ultrasoondoppler snelheidsmeter. -analyse van de werkingsprincipes en nauwkeurigheid-*  
Interafdelingsproject, Werktuigbouwkunde, 1983.
- [5] Brounts L.: *Bijlage bij: De Echovar F8 van Alvar, een ultrasoondoppler snelheidsmeter. -analyse van de werkingsprincipes en nauwkeurigheid-*  
Interafdelingsproject, Werktuigbouwkunde, 1983.
- [6] Kok J.J.: *Werktuigkundig regelen I*  
Collegedictaat, vakgroep Fundamentele Werktuigkunde, versie 1991.
- [7] Reneman R.S., Dongen van M.E.H., Meijer H.E.H.: *Humane stromingsleer*  
Collegedictaat, faculteit Technische Natuurkunde en faculteit Werktuigbouwkunde, 1992.
- [8] LabVIEW, version 3.0, 1993.
- [9] Vossers G.: *Fysische Transportverschijnselen*  
Collegedictaat, faculteit Technische Natuurkunde, 1986.
- [10] Verduin M., Braak L.H.: *Experimentele mechanica*  
Collegedictaat, vakgroep Fundamentele Werktuigkunde, 1991

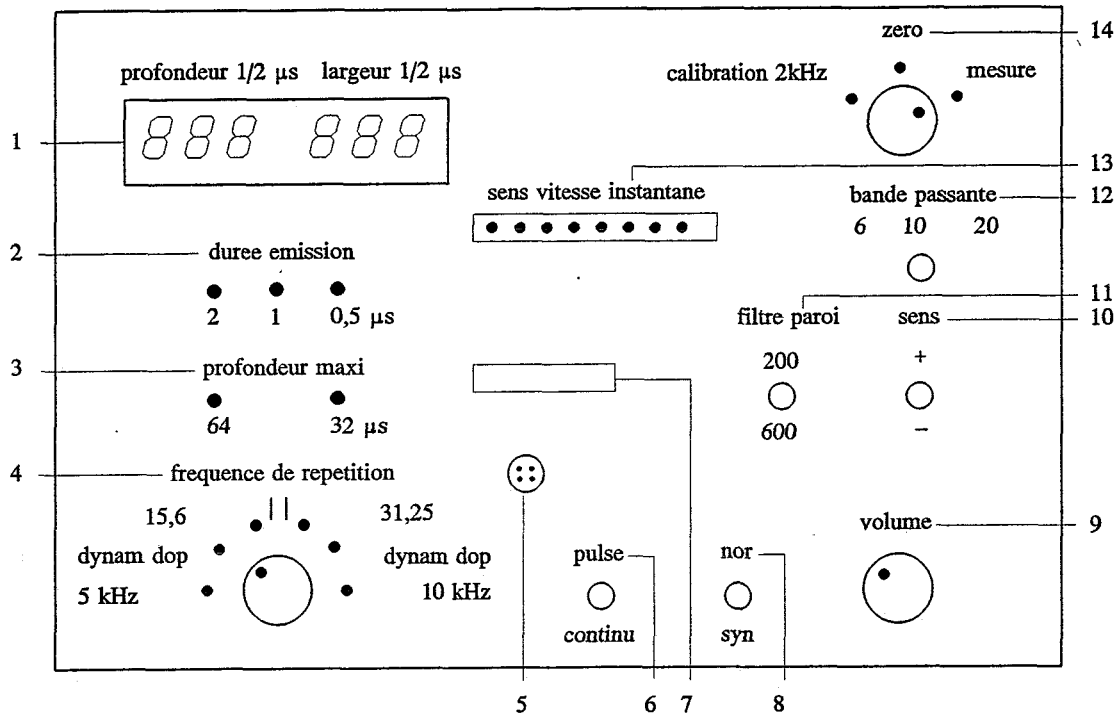
## Bijlage A

# Gebruiksaanwijzingen voor de Echovar F8

### A.1 Standaard front van de Echovar F8

Aan de hand van de in het figuur A.1 geschetste frontplaat van de snelheidsmeter zal het gebruik van het meetsysteem worden toegelicht.

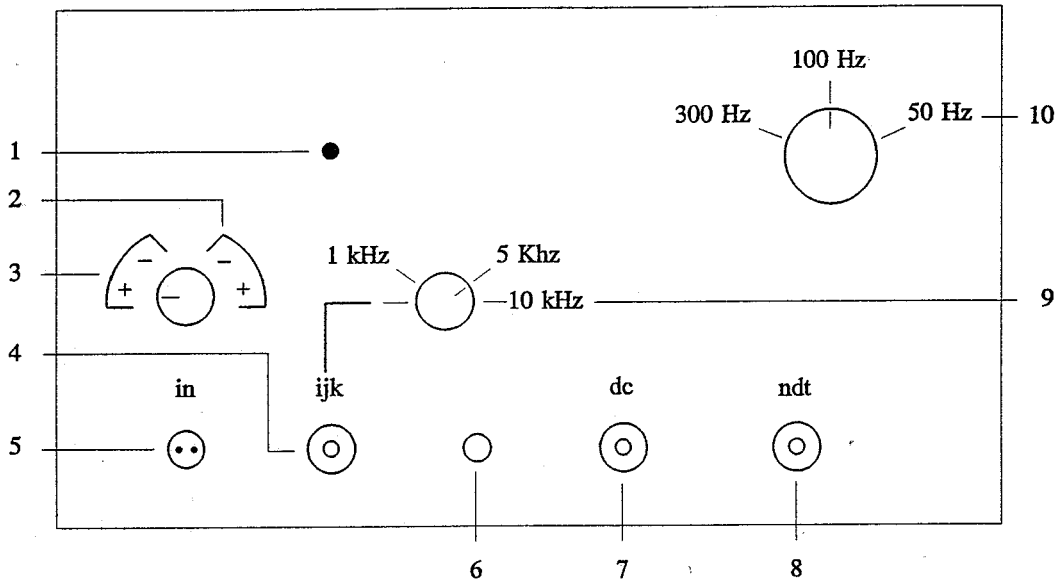
1. Door middel van een digitaal display wordt de vertragingstijd ofwel de meetdiepte ('profondeur') en de tijd dat het gate openstaat ('largeur') uitgelezen. Aangezien deze parameters afhankelijk zijn van de voortplantingssnelheid van het ultrageluid in het beschouwde medium, vindt de uitlezing plaats in de eenheid van tijd. Beide kunnen gevarieerd worden met eenheden van 0,5 sec. De instelling geschiedt met een viertal voetpedalen: 'profondeur +' en '-' en 'largeur +' en '-'. De aansluiting voor de voetpedalen bevindt zich aan de achterzijde van het meetsysteem ('télécommande').
2. Een LED-uitlezing geeft de lengte van het uitgezonden pulsje van 8 MHz. aan. De pulslengete kan worden ingesteld op 1/2, 1 of 2 sec., voor beide waarden van de  $f_{pr}$ .
3. De maximale meetdiepte wordt bepaald door de keuze van de  $f_{pr}$ . LED's geven de bij die  $f_{pr}$  horende maximale meetdiepte aan: 32 of 64 sec. Wanneer deze waarden worden overschreden, wordt het signaalverwerkingscircuit automatisch uitgeschakeld.
4. De  $f_{pr}$  kan worden ingesteld op 15,6 of 31,25 kHz. Volgens het frontplaatje bedraagt de maximale detecteerbare doppler-frequentie 5 en 10 kHz.
5. Een serie groene en rode LED's geeft de grootte en de richting van de stromingssnelheden aan. Het oplichten van de rode LED's correspondeert met een stroming, die naar de probe toe is gericht. De groene LED's corresponderen met een stroming die van de probe af is gericht. Een indicatie voor de grootte van de snelheid vormt de LED die in de betreffende serie oplicht, kwantitatieve informatie kan hieruit echter niet worden onttrokken.
6. Probehouder.
7. Aansluiting voor de probe. De Echovar F8 biedt de mogelijkheid om zowel single als double probes te gebruiken. Voor het geval een double probe wordt toegepast dient



Figuur A.1:

een vijfde voetpedaal te worden aangesloten (aan achterzijde: 'sonde double'). Met deze voetpedaal wordt bepaald welke van de twee kristallen geactiveerd wordt.

8. Keuzeschakelaar pulsed/continuous wave mode.
9. Keuzeschakelaar normal/synchronized input mode. Functie van de synchronized input mode onbekend.
10. Volume-regelaar audiosignaal.
11. Het teken van de uitgangspanningen van de 'gemiddelde' en 'instantane' snelheid kan met deze schakelaar wordengeïnvenceerd. Invertering heeft ook tot gevolg dat de onder 5 genoemde uitlezing van de richting van de snelheid door middel van groene en rode LED's wordt geïnvenceerd.
12. Keuzeschakelaar kantelfrequentie tweede orde actief hoogdoorlaatfilter, waarmee dopplersignalen van de verplaatsingen van de wand ('paroi') worden onderdrukt. In tegenstelling tot de op de frontplaat vermelde 200 Hz, blijkt de kantelfrequentie 300 Hz te bedragen.
13. Keuzeschakelaar kantelfrequentie tweede orde actief laagdoorlaatfilter aan de uitgang 'instantane snelheid'. Het frontplaatje doet vermoeden dat het hier een driestandsschakelaar betreft. Maar in praktijk blijken er maar twee standen mogelijk te zijn, namelijk 6 en 9 Hz.



Figuur A.2:

14. Keuzeschakelaar kalibratie/zero/meting. In de stand 'zero' wordt een spanning van 38 mV. aan de uitgangen 'gemiddelde' en 'instantane' snelheid opgedrukt. In de stand 'kalibratie' wordt een spanning van 3,79 V. aan deze uitgangen opgedrukt.

## A.2 Eerste uitbreiding van het front

Aan de hand van het in figuur geschetste frontplaatje, zal de uitbreiding aan het bestaande Alvar-systeem worden toegelicht.

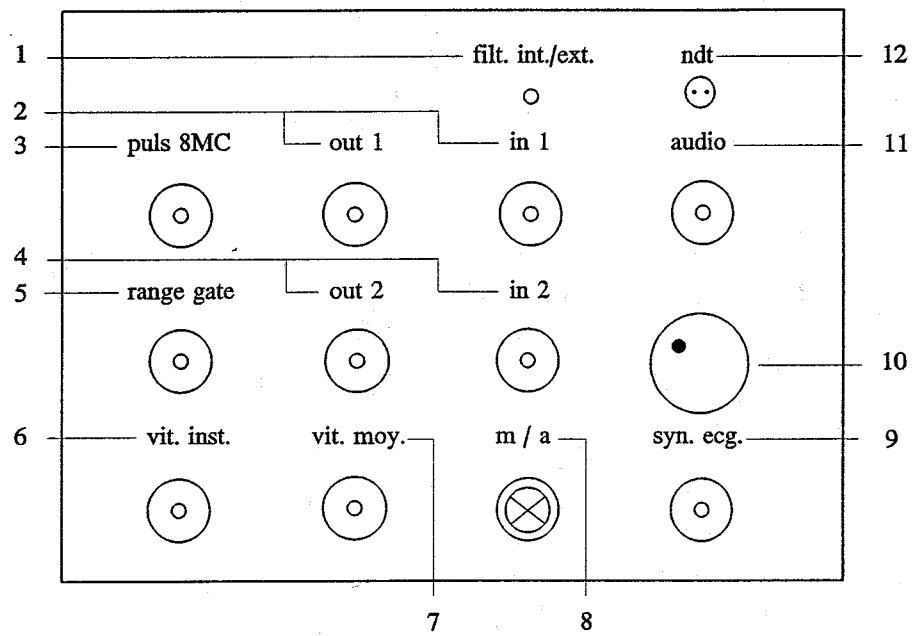
- Keuzeschakelaar intern/extern van het banddoorlaatfilter. Omhoog: intern. Omlaag: extern. In de stand 'extern' dienen twee identieke banddoorlaatfilters te worden aangesloten tussen de in- en de uitgangen 1 en 2. Wanneer we gebruik maken van de optie 'intern', dan kan de kantelfrequentie van het hoogdoorlaatfilter worden ingesteld op elke gewenste waarde. Als geheel geen hoogdoorlaatfiltering wordt toegepast, bedraagt de kleinste detecteerbare dopplervrequentie 80 Hz. Wanneer de externe pso wordt gebruikt, dient de kantelfrequentie te worden aangepast aan de keuze van het dynamisch meetbereik van het meetsysteem (schakelaar 10 in figuur A.2). Voor de standen 50, 100 en 300 Hz. moet de kantelfrequentie tenminste 100, 250 en 1000 Hz. bedragen. De kantelfrequentie van het laagdoorlaatfilter is afhankelijk van de keuze van de  $f_{pr}$ ; 7,3 of 15,6 kHz.
- In- en uitgang waartussen het bandfilter dient aangebracht te worden voor externe filtering: 'out' dient verbonden te worden met de ingang van het bandfilter en de uitgang van het filter met 'in'.

3. Uitlezing van het versterkte signaal.
4. In- en uitgang als onder punt 2.
5. Uitlezing van het range gate signaal.
6. Uitgang gemiddelde snelheid ('vitesse moyenne').
7. Uitgang instantane snelheid ('vitesse instante').
8. Aan/uit schakelaar van de Echovar F8.
9. Ingang synchronized input: functie onbekend.
10. Functie onbekend.
11. Externe uitgang audio-sigitaal.
12. Uitgang ndt-pulsjes van de beide signaalverwerkingslijnen voor verdere verwerking met externe pso.

### A.3 Tweede uitbreiding van het front

Uitleg bij figuur A.3:

1. LED indicatie aan/uit.
2. Invertering teken uitgangsspanning pso.
3. Invertering kalibratie-spanning.
4. Ingang voor externe kalibratie. Door op deze ingang een oscillator aan te sluiten kan elke gewenste kalibratie-spanning tussen 0 en 10 V aan de uitgang opgelegd worden.
5. Ingang ndt-pulsjes.
6. Uitgang ndt-pulsjes. Op deze uitgang kunnen eventueel alternatieve frequentie-meters worden aangesloten.
7. Uitgang pso.
8. Keuzeschakelaar pulsbreedte ndt-pulsjes. Deze schakelaar is aangebracht met het oog op de verwerking van de uitgangsspanning van de pso met een analoog/digitaal-converter. Het verhoogt de nauwkeurigheid van de frequentie-meting voor doppler-frequenties tot 5 kHz. Een en ander is zodanig uitgevoerd dat ook de kalibratie-spanningen van de oscillatoren worden verdubbeld.
9. In de pso zijn voor kalibratie-doeleinden drie oscillatoren ingebouwd met oscillatie-frequenties van 1, 5 en 10 kHz. De kalibratie-spanningen bedragen respectievelijk 1,5 en 10 V.
10. Keuzeschakelaar dynamisch meetbereik van de pso.



Figuur A.3:

## Bijlage B

# Labview

### B.1 Front panel

De in- en uitvoer voor de gebruiker tref je op het *front panel* aan. De gebruiker kan op verschillende manieren data invoeren: een schakelaar kan ingedrukt worden, potentiometers kunnen gedraaid worden of getallen of tekst m.b.v. het toetsenbord ingevoerd worden. Het is eveneens mogelijk menu's of tekstcommando's te creëren. De uitvoer kan op het scherm, diskette of printer zijn. De meest gebruikte uitvoer naar het scherm zijn grafieken en digitale indicatoren. De staat van het systeem wordt weergegeven door LED's, lichtjes en tekst. Met bovenstaande opties is het mogelijk om een reëel instrument op een computerscherm na te bouwen, met in- en uitvoer mogelijkheden gelijk een reëel instrument. Een instrument, dat aangemaakt is binnen LabVIEW, wordt dan ook VI of *Virtual Instrument* genoemd. Het realistische karakter van een VI maakt het programma gebruiksvriendelijk: wanneer de betekenis van de knoppen en schakelaars in de VI duidelijk zijn, is de bediening eenvoudig. Doch het ligt aan de kwaliteiten van de programmeur in hoeverre het *front panel* overzichtelijk en makkelijk te bedienen valt.

### B.2 Block diagram

Alle in- en uitvoer is verbonden van het *front panel* naar het *block diagram* bij wijze van *controls* bij invoer en *indicators* bij uitvoer. Voor elke *control* of *indicator* die op het *front panel* gemaakt is, verschijnt een blokje op het *block diagram*. De kleur van het blokje geeft weer met welke variabele je te maken hebt: oranje voor reële getallen, blauw voor integers, groen voor booleans etc. De omlijsting van het blokje geeft weer of het aangesloten is op een *control* of een *indicator*. *Controls* worden voor het algemeen gebruikt voor invoervariabelen die op een of andere manier verwerkt dienen te worden. Binnen LabVIEW zijn diverse operaties en functies voorhanden. Van simpele rekenalgoritme tot signaalverwerkings-analysis. Programma's in LabVIEW kennen een hiërarchische opbouw. Wanneer je een VI geschreven hebt, kun je deze VI als subVI in een andere VI inlezen. De subVI wordt dan weergegeven als een blokje in het *block diagram* van de VI.



## B.3 Programma overdrachtskarakteristiek van de pomp

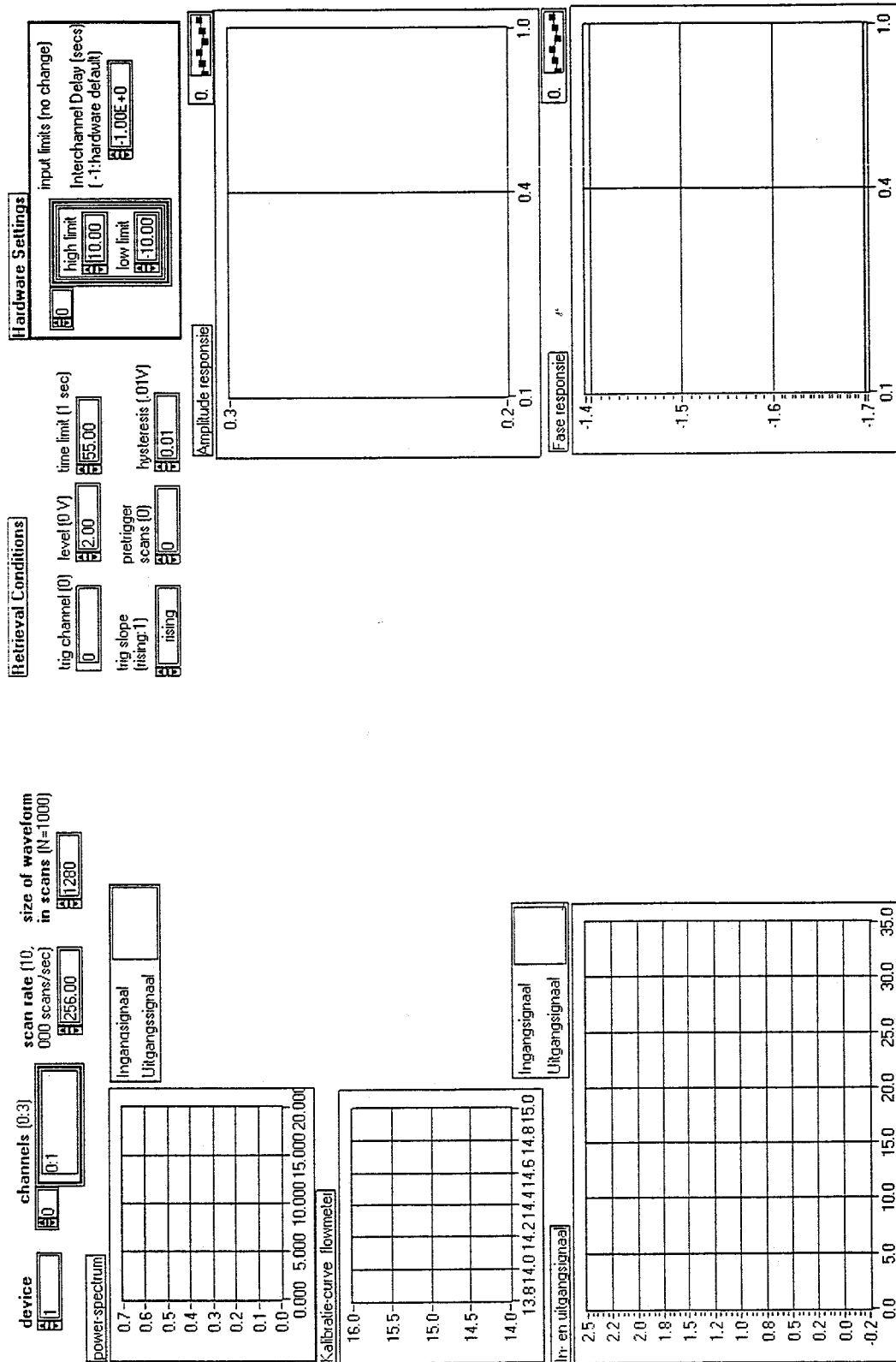
### B.3.1 Front panel

In deze bijlage is het *front panel* in figuur B.1 weergegeven zoals het gebruikt is tijdens de overdrachtsmetingen aan de pomp. Het geeft een indicatie wat er mogelijk is qua uitvoerscherm met LabVIEW. Het *front panel* wordt bediend met de muis. De toegang tot het programma (*block diagram*) kan voor de gebruiker geblokkeerd worden. Hierdoor ontstaat een virtueel instrument voor de gebruiker. De volgende functieblokken kunnen we op het *front panel* onderscheiden:

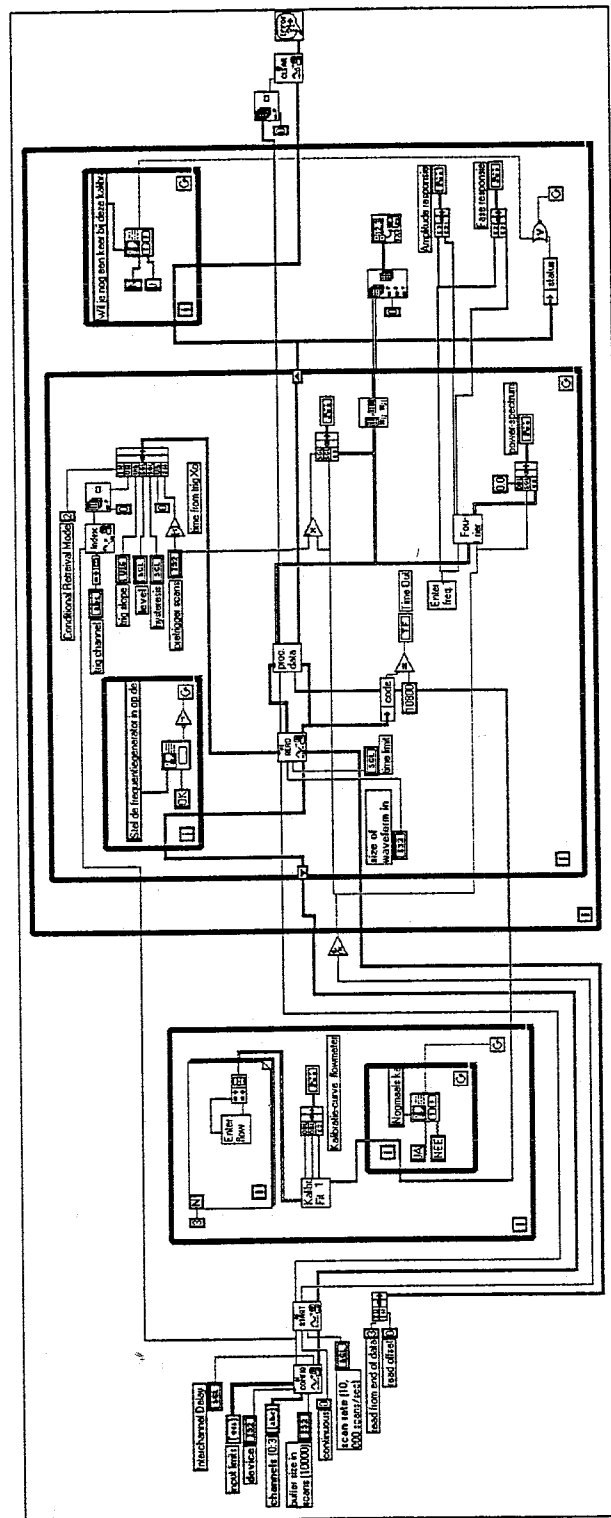
- **device:** geeft aan welke interface-kaart gebruikt wordt. De nummering van de interface-kaart geschiedt in de standaardinstellingen van LabVIEW.
- **channels:** biedt de mogelijkheid het aantal kanalen waarover men wil meten in te stellen.
- **scan rate:** aantal scans per seconde (default: 10.000 scans/sec).
- **size of waveform in scans:** aantal scans tijdens een meting. In deze instelling wordt er  $1280/256 = 5$  sec gemeten.
- **retrieval conditions:** het triggerkanaal en triggerniveau kunnen ingesteld worden. Tevens een tijdslijmiet waarbinnen het signaal op het gekozen kanaal de triggerdrempel moet halen. Op op- of neergaande flank triggeren of een aantal scans voor het triggerdrempel.
- **hardware settings:** Maximale en minimale spanning die op de kanalen gemeten wordt. De interface-kaart laat respectievelijk 10 V en -10 V toe.
- **grafieken:** de uitvoer voor de gebruiker. De witte ruimte in het midden van het *front panel* wordt gebruikt voor pop-up menu's. Het stelt de programmeur in staat informatie uit te wisselen met de gebruiker door middel van tekst, LED's, schakelaars of als tussentijdse invoer van gegevens.

### B.3.2 Block diagram

Het *block diagram* ziet er voor de bepaling van de overdrachtskarakteristiek als in figuur B.2 uit.



Figuur B.1: front panel



Figuur B.2: block diagram

## Bijlage C

# Kalibratie van de flowmeter

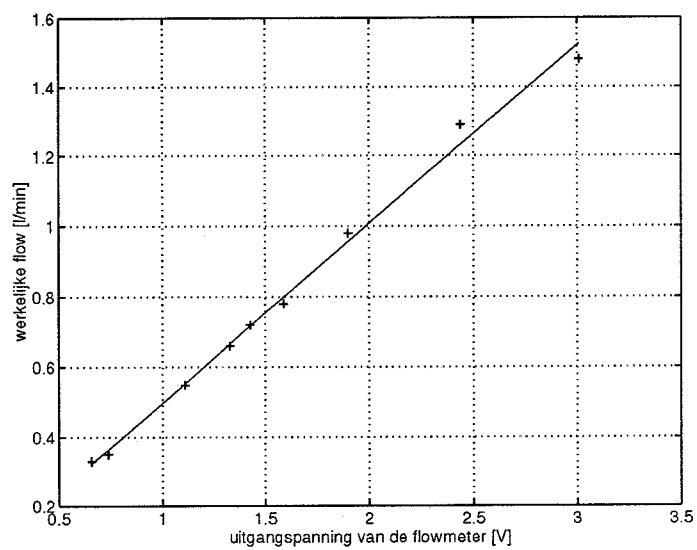
We stellen de pomp in op verschillende toerentallen. Bij deze standen meten we de werkelijke flow aan het einde van het systeem (figuur 3.1) m.b.v. een maatbeker en een stopwatch. Hierbij wordt de werkelijke flow als functie van de uitgangsspanning van de meetversterker van de flowmeter gemeten. Dit levert de volgende meetwaarden op:

werkelijke flow ltr./min.	uitgangsspanning V.	display ml./min.
0,33	0,66	335
0,35	0,74	367
0,55	1,11	562
0,66	1,33	660
0,72	1,43	717
0,78	1,59	794
0,98	1,90	943
1,29	2,44	1210
1,48	3,01	1440

De relatie werkelijke flow - uitgangsspanning geeft een kalibratie-curve weergegeven in figuur C.1. Er vindt een polynoomfit van de eerste orde plaats. Deze eerste-orde fit ziet er als volgt uit:

$$p(x) = 0,51x - 0,01 \quad [l/min] \quad (C.1)$$

De maximale relatieve fout 0,03 bedraagt. In het LabVIEW-programma om de overdrachtsfunctie van de pomp te bepalen worden bovenstaande polynoomcoëfficiënten gebruikt.



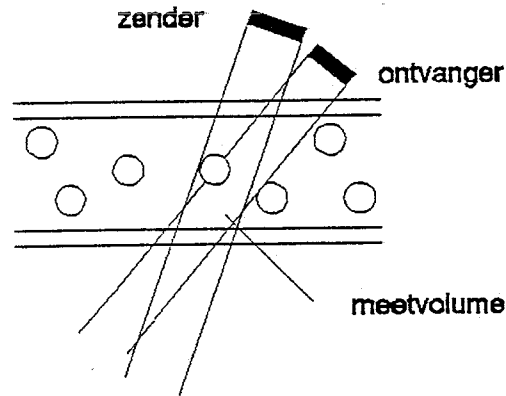
Figuur C.1: kalibratiecurve flowmeter

## Bijlage D

# Practicum: ultrasoon-snelheidsmeting

### D.1 Inleiding

In het kader van het bloed/vaatwand interactie-onderzoek wordt een studie uitgevoerd naar stromingspatronen in modellen van bloedvaten. Ultrasoon dopplermetingen kunnen gebruikt worden om bij patiënten non-invasief snelheden van de bloedstroming te meten. Uit de stromingspatronen kan men vroegtijdig vernauwingen in de bloedvaten constateren. In het kader van dit practicum zullen we kijken naar de snelheidsprofielen in de halsslagadervertakking. De halsslagader voorziet éenerzijds je gezicht van bloed d.m.v. de kleinere slagader na de vertakking, anderzijds je hersenen d.m.v. de grotere slagader na de vertakking. Vooral in deze slagader is de medische wereld geïnteresseerd. In zijn vreemde verwijding (de bulbus) vindt er een afzet van deeltjes op de binnenwand plaats. De opzet van dit practicum is om je inzicht geven in hoeverre het optredende stromingsprofiel bepalend is voor dit verschijnsel.



Figuur D.1:

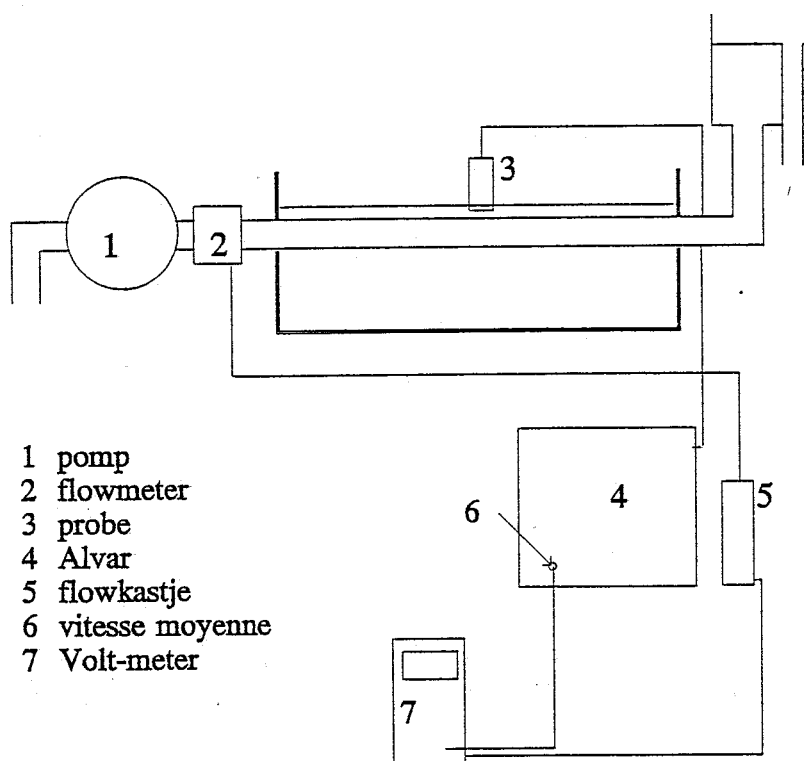
## D.2 De meetopstelling

### D.2.1 Principe van de dopplermeting.

De ultrasonische snelheidsmeettechniek is gebaseerd op het doppler-effekt: geluid dat door een bewegend object wordt verstrooid zal door een stilstaande waarnemer worden waargenomen met een frequentie die t.o.v. de oorspronkelijke frequentie van de eveneens stilstaande bron een verschuiving heeft ondergaan, welke evenredig is met de snelheid van dat object. De bron en de waarnemer bevinden zich in de probe. De Alvar (zie figuur D.2) zendt een hoogfrequent signaal (15,6 kHz) uit via de probe. Door de buis stroomt water met daarin opgelost polystyreen-deeltjes. Deze deeltjes zullen de frequentie van de opvallende geluidsgolven door hun snelheid veranderen. De teruggekaatste golf wordt weer opgevangen door de probe. Het frequentieverschil is de dopplerfrequentie en kunnen we horen (zoals later tijdens het meten blijkt).

### D.2.2 Beschrijving meetopstelling

De pomp pompt uit een buffervat water omhoog. Aan deze pomp zit een toerentalkastje geschakeld, waarmee we de stromingssnelheid van het water door de buis kunnen instellen. Achter de pomp zit een flowmeter. De flow kunnen we aflezen van de flowmeter naast de Alvar. In de waterbak ligt een elastische buis met aan het eind een vertakking. Na de vertakking bevat één buis een verwijding (de bulbus). Het water komt uiteindelijk in een overloopvat terecht van waaruit het terug in het buffervat loopt.



Figuur D.2:



Boven de elastische buis, in een statief, hangt de probe die met de Alvar verbonden is. M.b.v. de Alvar kun je de meetdiepte en de grootte van je meetgebied/meetvolume (de gate) instellen (zie figuur D.1). Zet de Alvar aan. Op het display kun je de waarde van je profondeur en largeur aflezen. De profondeur geeft de meetdiepte weer, de largeur de breedte van je meetvolume. Op de grond vindt je vier gaspedalen. Twee pedalen zijn er van de profondeur (+ en -). Met deze pedalen stel je de meetdiepte in. Iedere  $0.5 \mu\text{s}$ . komt overeen met  $0,4 \text{ mm}$ . Met de pedalen van de largeur (+ en -) kun je de breedte van je gate instellen. Deze gate geeft de grootte van je meetgebied weer op een bepaalde meetdiepte. Op de oscilloscoop kun je deze twee kanalen zien kanaal B laat de reflectie van de gehele doorsnede van de buis zien. Kanaal A laat de positie van je gate zien. Maak de gate  $2 \mu\text{s}$ . groot en laat de meetdiepte verschillende waarden doorlopen. Als je het geluid wat harder zet, hoor je de snelheden in de buis toe- en afnemen.

### D.3 Afleiden stromingsvergelijkingen

Vanuit de stromingsleer kunnen we algemene wetten voor behoud van massa en impuls voor een onsamendrukbare vloeistof met een constante viscositeit opstellen:

Behoud van massa:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (\text{D.1})$$

Behoud van impuls:

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho(\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v} + \nabla p - \eta \nabla^2 \vec{v} = 0 \quad (\text{D.2})$$

Hierin is  $\rho$  de dichtheid van de vloeistof,  $\eta$  de viscositeit,  $p$  de druk en  $\vec{v} = (v_1, v_2, v_3)$  de snelheidsvector van een vloeistofelement.

Vergelijking (D.2) bestaat uit drie vergelijkingen, voor iedere component van  $\vec{v}$  één. Deze vergelijkingen worden de Navier-Stokes vergelijkingen genoemd. De eerste term in de Navier-Stokes vergelijkingen weerspiegelt de instationaire traagheidskrachten. De tweede term vertegenwoordigt de convectieve traagheidskrachten, die niet-lineair zijn. De derde term vertegenwoordigt de drukkrachten en de laatste term de visceuze krachten. De zwaartekrachtsterm is verwaarloosd. In cilindercoördinaten zien deze vergelijkingen er dan als volgt uit:

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{D.3})$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial r} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (\text{D.4})$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{u}{r^2} \right) \quad (\text{D.5})$$

Met  $u$  de radiale snelheid,  $w$  de axiale snelheid,  $r$  de radiale coördinaat,  $z$  de axiale coördinaat en  $\nu = \mu/\rho$  de kinematische viscositeit. De snelheden en de drukgradiënt in de tangentele richting ( $\theta$ ) zijn nul verondersteld.

Met behulp van dit stelsel vergelijkingen (D.3),(D.4),(D.5) is het mogelijk om het gedrag van een onsamendrukbare, Newtoniaanse vloeistof in een starre of elastische buis te beschrijven.

We kunnen bovenstaande vergelijking voor onze situatie als volgt vereenvoudigen: de stroming is stationair en volledig ontwikkeld, dus:

$$w = w(r) \quad (\text{D.6})$$

$$u = 0 \quad (\text{D.7})$$

$$p = p(z) \quad (\text{D.8})$$

$$\frac{\partial}{\partial t} = 0 \quad (\text{D.9})$$

- Laat zien dat m.b.v. de gegeven vereenvoudigingen bovenstaande vergelijkingen ((D.3), (D.4), (D.5)) overgaan tot één vergelijking, namelijk:

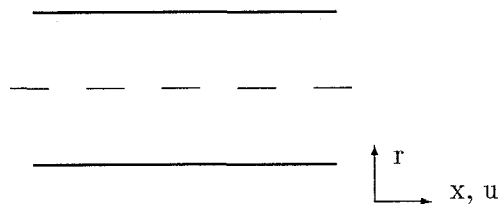
$$0 = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial w}{\partial r} \right) \right) \quad (\text{D.10})$$

Je houdt dus nu een tweede orde vergelijking naar  $r$  over met een druk die afhankelijk van de  $z$ -richting is. Uit deze vergelijking kun je een snelheidsprofiel voor een rechte buis afleiden. Daarbij maak je gebruik van de volgende randvoorwaarden:

$$\frac{\partial w}{\partial r} = 0 \quad \text{op } r = 0 \quad (\text{D.11})$$

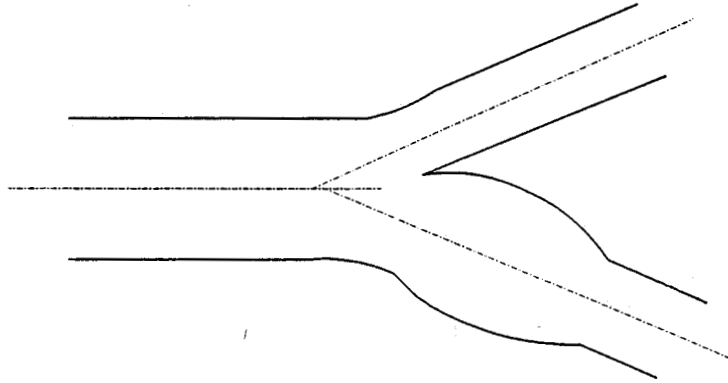
$$w = 0 \quad \text{op } r = R \quad (\text{D.12})$$

- Los aan de hand van bovengestelde randvoorwaarden de differentiaalvergelijking op.
- Schets het snelheidsprofiel zoals je het verwacht aan de hand van de berekende snelheidsverdeling.



Maar we zijn niet alleen geïnteresseerd in het snelheidsprofiel in de rechte buis maar in het snelheidsprofiel in de verwijding na de vertakking (de bulbus).

- Schets het snelheidsprofiel in de bulbus. Teken daarvoor vanuit de gegeven punten het verloop van de stroomlijnen door de buis. (Stroomlijnen zijn lijnen waarvan de raaklijn op elk moment dezelfde richting heeft als de deeltjessnelheid).



De hoeveelheid water, die per seconde door de buis stroomt, wordt gegeven door de flow met de formule.

$$\Phi = \int_0^{2\pi} \int_0^R u \cdot r \, dr \, d\phi \quad (\text{D.13})$$

- Vul de berekende uitdrukking voor de snelheid in de formule van de flow en reken deze uit.

## D.4 Meten

### D.4.1 Kalibreren flowmeter.

Stel de pomp in op een bepaald toerental. We berekenen de werkelijke flow door het water, dat uit het overloopvat in het buffervat loopt, op te vangen in een maatglas. Neem de tijd op (stopwatch) hoelang het duurt, voordat we een liter in het maatglas hebben opgevangen.

-Doe deze metingen bij de volgende instellingen: 75, 125 en 200 en bereken hiervoor de flow.

De flowmeter geeft voor de betreffende toerentallen andere flowwaarden aan. Lees van een Volt-meter de uitgangsspanning van de flowmeter af.

- Zet in een grafiek uit de werkelijke, berekende, flow tegen de gemeten flow (flowmeter). Deze grafiek zullen we in een latere meting nodig hebben.

#### D.4.2 Meten snelheidsprofiel in de rechte buis.

Stel het toerental van de pomp in op 200. M.b.v. de probe zullen we op gelijke afstanden over de buis de snelheden van de stroming meten. Plaats de probe boven het midden van de buis. Plaats met de profondeur het meetvolume (de gate) in het midden van de buis. Je kunt de buiswanden onderscheiden door in de buis te knijpen, op je scherm zullen de wanden bewegen. We zitten nu in het midden van de buis ( draai het geluid harder en je hoort de deeltjes stromen). Plaats de meetklok tegen de probe. Draai de probe buiten de buis. (Ter controle kun je het geluid weer harder zetten en hoor je nu geen deeltjes meer stromen).

De verschillende dopplerfrequenties, die de probe opvangt, worden door de Alvar omgezet in uitgangsspanningen die met snelheden in de buis overeenkomen.

- Maak een tabel waarin je de plaats van de probe tegen de uitgangsspanning (uitgang: vitesse moyenne (zie figuur D.2)) van de Alvar kunt zetten. Meet gedurende twee seconde de vitesse moyennne m.b.v. een Volt-meter. Draai de probe met stappen van 1 mm. over de buis. Wanneer je over de buis bent, stop je de meting.

- Zet in een grafiek de plaats van de probe uit tegen de uitgangsspanning.

- Klopt het snelheidsprofiel met datgene wat je berekent hebt?

- Bereken m.b.v. de formule voor de flow en de werkelijke waarde van de flow, de gemiddelde snelheid in de buis. Je kunt nu de maximale snelheid vanuit het snelheidsprofiel berekenen.

#### D.4.3 Meten snelheidsprofiel in de bulbus.

De meetprocedure is dezelfde als bij de meting in de rechte buis. Zorg ervoor, wanneer je de probe verplaatst, dat de probe loodrecht over de buis beweegt. Meet met intervallen van 1 mm.. Teken de grafiek.

-Verklaar het verloop van de grafiek.