

MASTER

Het ontwerp van een meetinstrument voor het mechanisch en fysiologisch onderzoek aan skeletspieren van muizen

de Louw, J.A.H.

Award date:
1997

[Link to publication](#)

Disclaimer

This document contains a student thesis (bachelor's or master's), as authored by a student at Eindhoven University of Technology. Student theses are made available in the TU/e repository upon obtaining the required degree. The grade received is not published on the document as presented in the repository. The required complexity or quality of research of student theses may vary by program, and the required minimum study period may vary in duration.

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

**HET ONTWERP VAN EEN MEETINSTRUMENT
VOOR HET MECHANISCH EN FYSIOLOGISCH
ONDERZOEK AAN SKELETSPIEREN VAN
MUIZEN**

april 1997

J.A.H. de Louw

Rapportnummer: WPA 310059

HET ONTWERP VAN EEN MEETINSTRUMENT VOOR HET MECHANISCH EN FYSIOLOGISCH ONDERZOEK AAN SKELETSPIEREN VAN MUIZEN

J.A.H. de Louw

april 1997

Technische Universiteit Eindhoven
Faculteit der Werktuigbouwkunde

Afstudeerverslag

Leerstoel : Precision Engineering
Sectie : Constructies en Mechanismen
Afstudeerhoogleraar : Prof. dr. ir. P.H.J. Schellekens
Afstudeerbegeleiders : Dr. ir. P.C.J.N. Rosielle
: E.A.G. Reker
: Dr. ir. M.R. Drost

Rapportnummer : WPA 310059

Samenvatting

Door de vakgroep Bewegingswetenschappen van de Universiteit Maastricht wordt in samenwerking met de Technische Universiteit Eindhoven wetenschappelijk onderzoek verricht naar het functioneren van skeletspieren, en stoornissen daarin. Dit onderzoek is getiteld 'Functie en dysfunctie van de skeletspier'. De interesse binnen dit onderzoek gaat onder andere uit naar de invloed van defecten van één of meerdere enzymen in de energiehuishouding van de skeletspier. Het is bij muizen mogelijk gebleken om de enzymen die betrokken zijn bij de skeletspierstofwisseling op moleculair biologische wijze te manipuleren. Om fysiologische en mechanische effecten van deze manipulatie te kunnen bestuderen is in de groep Constructies en Mechanismen van de leerstoel Precision Engineering van de Technische Universiteit Eindhoven een meetinstrument ontworpen. Met dit meetinstrument is het mogelijk de kuit- en scheenspier van een muis te onderzoeken. Het spierkoppel om de enkel kan hierbij bepaald worden tijdens gedefinieerde verlenging en verkorting van de spier (dynamisch meten van respectievelijk een excentrische en een concentrische contractie) en tijdens gelijkblijvende spierlengte (statisch meten van een isometrische contractie). Het maximale spierkoppel dat een kuitspier kan leveren bedraagt tijdens excentrische contractie 38.3 mNm en tijdens isometrische contractie 19.9 mNm. Voor de scheenspier gelden spierkoppels van respectievelijk 7.6 mNm en 4.0 mNm. De spierlengte-verandering wordt gerealiseerd door rotatie van de voet rondom de enkelas. Vanwege de overeenkomst met de fysiologische voortbeweging van de muis moet de voetrotatie sinusvormig zijn met een maximale amplitude van 45° en een frequentie van 8.5 Hz.

Er zijn twee concepten onderzocht waarmee een koppel gemeten kan worden, een zogenaamd 'elastisch concept' en een 'mechatronisch concept'. Het elastisch concept maakt gebruik van een koppelsensor die de vervorming meet van een component met een bekende rotatiestijfheid. Bij het mechatronisch concept wordt een koppel gemeten door deze te relateren aan het geleverde koppel door een servomotor. Hierbij is de stroom door de spoel van de motor een maat voor het koppel. Van iedere constructie zijn verschillende types ontworpen die een meetbereik hebben afgestemd op de meting van de kuitspier en de meting van de scheenspier, waardoor onder alle omstandigheden een zo groot mogelijke nauwkeurigheid gehaald wordt.

Van het elastische concept is een thans op de markt verkrijgbare 'TSF-koppelsensor' vergeleken met een eigen ontwerp van een koppelsensor. Daaruit is gebleken dat de koppelsensoren van het eigen ontwerp dankzij een hogere rotatiestijfheid en een lagere massa draagheid van het roterende meetgedeelte in alle gevallen nauwkeuriger zijn. Een verhoogde nauwkeurigheid is tevens verkregen door met twee sensoren in plaats van één de meting van de elastische vervorming te verrichten. Hierdoor kan ook een meetwaarde als gevolg van een eventuele kracht worden onderscheiden van een meetwaarde als gevolg van een koppel. De sensor heeft naar verwachting een zeer goede lineariteit en is hysteresevrij. Ook is de sensor compacter dan de TSF-koppelsensor. De voorkeur gaat uit naar de koppelsensor van het eigen ontwerp.

Van het mechatronische concept zijn twee servosystemen met elkaar vergeleken aan de hand van een modellering van overdrachtsfuncties. Het ene servosysteem maakt gebruik van een constructie met een hoge resolutie laser-encoder van Canon (> 80.000 counts/omw.), het andere servosysteem van een constructie met een lage resolutie encoder van Hewlett-Packard (max. 8192 counts/omw.). Vanwege de veel lagere massa draagheid van de Hewlett-Packard encoder is het mogelijk een constructie te maken met een hogere laagste mechanische eigenfrequentie dan met de Canon encoder. Hierdoor heeft het servosysteem met de Hewlett-Packard encoder een hogere bandbreedte, wat zich vertaalt in een hogere meetnauwkeurigheid van een koppel bij dynamische metingen. Bij statische metingen ondervindt het servosysteem echter de invloed van de beperkte resolutie waardoor de nauwkeurigheid slechter wordt. Bij het servosysteem met de Canon-encoder treedt dit verschijnsel niet op, waardoor bij statische en laagfrequente metingen het systeem een zeer hoge meetnauwkeurigheid van laagfrequente (< 20 Hz) spierkoppels heeft. Tenslotte is de constructie van het lage resolutie servosysteem compacter en heeft met de Hewlett-Packard encoder geen extra encoderlagering, waardoor extra wrijving wordt vermeden. De voorkeur bij het mechatronische concept gaat uit naar het lage resolutie servosysteem.

Voor de ontwikkeling van de muisfixatie is de muizepoot gemodelleerd met een stangenmodel. Uit dit model is gebleken dat de kracht van zowel de kuit- als de scheenspier gemeten kan worden door het vastleggen van de positie van het heup- en enkelgewricht. Het vastleggen van het enkelgewricht gebeurt met de meetas van het meetinstrument. Hierbij ontstaat er een excentriciteit tussen enkelas en meetas. Na afschattingen van de afwijkingen die hierdoor ontstaan, is aangetoond dat deze excentriciteit toelaatbaar is. Voor het vastleggen van

het heupgewricht is een prototype van een fixatie ontworpen, welke de heup van de muis met de muizestaart tegen een aanslag trekt, de zogenaamde staartfixatie. Experimenten hebben een verbeterd tweede prototype opgeleverd. Nieuwe experimenten met dit tweede prototype hebben de noodzaak aangetoond van een voorziening om de knie in het vlak van koppelmetering te houden. Hiervoor is een kniegeleiding ontworpen. De beweging in het heupgewricht bedroeg bij een derde sessie experimenten met deze kniegeleiding ± 0.5 mm vooral in de richting van de rug van de muis. Omdat naar alle waarschijnlijkheid de stijfheid van de heupfixatie naar rugzijde groter is wanneer de trekkracht in de staart onder een gunstigere hoek met de heupaanslag aangebracht wordt, is een derde staartfixatie ontworpen waarin dit het geval is.

Op grond van de grootst haalbare nauwkeurigheid onder alle omstandigheden is gekozen om de koppelsensoren van het eigen ontwerp met een meetbereik van 4 en 20 mNm uit te werken voor statische metingen, en voor dynamische metingen beide types van het lage resolutie servosysteem. De meetunits zijn zodanig ontworpen dat ze allen dezelfde afmetingen hebben zodat ze op dezelfde wijze in het totale meetinstrument geïntegreerd kunnen worden. Voor het wisselen van meetunits is een mechanisme aangebracht waarmee het mogelijk is de voet tijdens het wisselen te fixeren. Om onderkoeling van de muis te voorkomen wordt het aluminium plateau waarop de muis ligt op een constante temperatuur van 40°C gehouden met behulp van een temperatuurregeling.

Onder bijna alle omstandigheden (spierkoppel < 30 Hz) kan een meetonnauwkeurigheid van beter dan 2% gehaald worden. Bij een sterk dynamisch koppel (30 ~ 50 Hz) kan een meetonnauwkeurigheid van beter dan 5% gehaald worden bij een statische meting aan de scheenspier, en beter dan 3% bij een statische meting aan de kuitspier. Bij dynamische metingen wordt een sterk dynamisch koppel gemeten met een onnauwkeurigheid beter dan 2%. Onder alle omstandigheden is de hoekonnauwkeurigheid van de voet beter dan 1°. Naast sinusvormige bewegingen met een frequentie van maximaal 8.5 Hz zijn door het servosysteem eventueel ook andere bewegingen te realiseren en zijn ook hogere frequenties haalbaar.

Voorwoord

Voor U ligt het resultaat van mijn afstudeerproject waaraan ik met veel plezier gewerkt heb. Ik wil de hele groep van constructies en mechanismen bedanken voor hun creatieve inbreng tijdens de wekelijkse bijeenkomsten op vrijdag. Met name wil ik Nick Rosielle danken voor zijn begeleiding, Eef Reker en de CTD voor de realisatie van de experimentele opstellingen.

Het feit dat ik met veel plezier heb kunnen werken is onder meer te danken aan de prettige werksfeer die binnen de vakgroep bewegingswetenschappen heerst. Een groep waarbinnen mij zeer goede faciliteiten zijn geboden en zich karakteriseert door zeer behulpzame collega's. Speciaal wil ik Maarten Drost bedanken voor zijn begeleiding en het wegwijs maken in de wereld van de biologie en Mathijs Hesselink voor de benodigde experimentele ervaringen. Marchel Gorselink bedank ik voor de hulp tijdens de experimenten en het verzamelen van de voor het ontwerp benodigde muizegegevens. Tevens was hij een prima kamergenoot en altijd goed voor leven in de brouwerij.

Mijn vriendin Natasja wil ik danken voor haar medeleven en de nodige ontspanning naast de studie. Ook Marnix is verantwoordelijk geweest voor de nodige afleiding, niet alleen tijdens mijn afstuderen, maar ook gedurende elf jaren die daaraan vooraf gingen. Tenslotte ben ik mijn ouders zeer dankbaar voor hun geduld en steun op alle fronten.

Inhoud

SAMENVATTING	I
VOORWOORD.....	III
INHOUD	IV
SYMBOLEN.....	VII
1 INLEIDING	1.1
1.1 Het Onderzoek.....	1.1
1.2 Een beschrijving van de skeletspiercontractie	1.2
1.2.1 De opbouw van een skeletspier.....	1.2
1.2.2 De beschrijving van het contractie-mechanisme.....	1.3
1.2.3 De relatie tussen de krachtleverantie en de spierlengte.....	1.4
1.2.4 De relatie tussen krachtleverantie en reksnelheid	1.5
1.3 Elektrostimulatie van de spier.....	1.5
1.4 Het skeletspier vezeltype.....	1.6
1.5 De ontwerpeisen voor het meetinstrument.....	1.6
1.5.1 De algemene eisen	1.6
1.5.2 De specificaties.....	1.6
1.6 De opbouw van het verslag	1.8
2 ELASTISCH KOPPEL METEN	2.1
2.1 Koppelsensor ontwerp I.....	2.1
2.1.1 De servomotor	2.2
2.1.2 De keuze van het sensortype.....	2.3
2.2 Koppelsensor ontwerp II	2.3
2.2.1 De optimalisatie van de dimensies.....	2.4
2.2.1.1 De bepaling van de benodigde rotatiestijfheden	2.4
2.2.1.2 De bepaling van de bladveerdimensies	2.5
2.2.1.3 De bepaling van de meetschijfdikte	2.6
2.2.2 De Servomotor.....	2.8
2.3 Nauwkeurigheid van de koppelmeting en de beweging van de verschillende koppelsensoren.....	2.8
2.3.1 De hoeknauwkeurigheid bij een statische meting.....	2.8
2.3.2 De hoeknauwkeurigheid bij een dynamische meting.....	2.9
2.3.3 De nauwkeurigheid van de koppelmeting bij een statisch koppel	2.10
2.3.4 De nauwkeurigheid van de koppelmeting bij een dynamisch koppel	2.11
2.4 Conclusie	2.12

3	MECHATRONISCH KOPPEL METEN	3.1
3.1	Inleiding.....	3.1
3.1.1	Het werkingsprincipe	3.1
3.1.2	De opbouw van het totale servosysteem	3.1
3.2	De ontwerpen van het meetinstrument.....	3.2
3.2.1	De constructie voor het hoge resolutie servosysteem	3.2
3.2.1.1	Beschrijving	3.3
3.2.1.2	De elektromotor	3.3
3.2.1.3	De encoder	3.4
3.2.1.4	De lagering.....	3.4
3.2.2	De constructie voor het lage resolutie servosysteem	3.4
3.2.2.1	Beschrijving	3.5
3.2.2.2	De encoder	3.5
3.3	De keuze van de versterker en de besturing.....	3.5
3.4	Modellering	3.5
3.4.1	De modellering van het hoge resolutie servosysteem	3.6
3.4.2	De modellering van het lage resolutie servosysteem	3.7
3.4.3	De bepaling van de overdrachtsfuncties	3.8
3.4.4	Het onderscheid tussen metingen aan de kuit- en aan de scheenspier	3.8
3.4.5	Een beschouwing ten aanzien van de encoderresolutie	3.9
3.4.6	De stabiliteit.....	3.10
3.4.7	De instelling van de regelparameters voor de verschillende ontwerpen	3.10
3.4.7.1	De instelling van de hoge resolutie servosystemen.....	3.10
3.4.7.2	De instelling van de lage resolutie servosystemen	3.12
3.5	De nauwkeurigheid van de koppelmetering en de beweging van de verschillende ontwerpen	3.13
3.5.1	Correctie voor het versnellingskoppel	3.13
3.5.2	Wrijving.....	3.14
3.5.3	De nauwkeurigheid van de beweging	3.15
3.5.4	De nauwkeurigheid van de koppelmetering.....	3.16
3.6	Conclusie	3.17
3.6.1	Een vergelijking van beide ontwerpen.....	3.17
3.6.2	Algemene conclusies ten aanzien van het concept	3.17
4	DE MUISFIXATIE.....	4.1
4.1	De muizepoot.....	4.1
4.2	Het fixatie principe	4.2
4.3	Het ingieten van de muizevoet.....	4.3
4.3.1	De Gietmal.....	4.4
4.3.2	Het gietmateriaal.....	4.5
4.4	De voetfixatie.....	4.6
4.5	De staartfixatie.....	4.7
4.5.1	Prototype 1.....	4.7
4.5.2	Prototype 2.....	4.8
4.5.3	Experimenten aan prototype 2 (deel I).....	4.9
4.5.4	De kniegeleiding	4.10
4.5.5	Experimenten aan prototype 2 (deel II)	4.10
4.5.6	Prototype 3.....	4.12
4.6	Conclusie	4.12

5. HET TOTAALONTWERP VAN HET MEETINSTRUMENT	5.1
5.1 De meetunits.....	5.1
5.1.1 Het ontwerp van de statometers.....	5.2
5.1.2 Het ontwerp van de dynamometers.....	5.4
5.2 De integratie van de verschillende componenten in het meetinstrument	5.4
5.2.1 De positionering van de meetunit	5.4
5.2.2 Het wisselmechanisme voor de muizevoet	5.7
5.2.3 De beheersing van de lichaamstemperatuur van de muis	5.8
5.2.4 Het meten van beide muizevoeten	5.9
6. CONCLUSIES	6.1

REFERENTIES

BIJLAGEN

- B1 De muisexperimenten
- B2 Specificaties van de koppelsensoren en van de inductieve sensoren
- B3 De optredende voetsnelheden en versnellingen
- B4 Analytische bladveerberekening
- B5 ALGOR[®] berekeningen
- B6 De massatraagheidsberekening van de meetschijf
- B7 De motorexperimenten
- B8 De berekening van de modellering van de servosystemen
- B9 De wrijvingsberekening van de lagers in de servosystemen
- B10 Het krachtenspel in de muizepoot
- B11 De tekeningen van de meetunits
- B12 De berekening van de warmteoverdracht van het meetplateau

Symbolen

a	versnelling	[m/s ²]
b	breedte	[m]
c	stijfheid, specifieke warmte capaciteit	[N/m],[J/(kg·K)]
d	dempings-coëfficiënt	[N·s/m]
f	frequentie	[Hz]
g	gravitatie constante	[m/s ²]
g _s	servo-dempingscoëfficiënt	[N·m·s/rad]
h	hoogte	[m]
h _c	warmte overdrachtscoëfficiënt	[W/(m ² ·K)]
i	overbrenging	verschillend
k	rotatiestijfheid, versterking	[Nm/rad], verschillend
k _{em}	motorconstante	[Nm/A]
k _s	servo-stijfheid	[Nm/rad]
l	lengte	[m]
m	massa	[kg]
r	straal	[m]
s	complexe frequentie	[s ⁻¹]
t	dikte	[m]
x	verplaatsing	[m]
y	lengte	
A	amplitude, oppervlak	[°],[m ²]
B	amplitudemarge, magnetische fluxdichtheid	[-],[T]
E	elasticiteits-modulus, energie	[N/m ²],[J]
E _{bew}	tegen-EMK	[V]
F	kracht, vormfactor	[N], [-]
G	afschuivings-modulus	[N/m ²]
H	overdrachtsfunctie	verschillend
I	stroom	[A]
J	massatraagheidsmoment	[kg·m ²]
L	inductantie	[H]
M	moment	[N·m]
P	vermogen	[W]
Q	warmte	[W]
R	weerstand, straal	[Ω],[m]
T	koppel, temperatuur	[N·m],[K]
U	spanning	[V]
V	volume	[m ³]
α	hoek, temperatuur vereffeningscoëfficiënt	[rad] of [°],[m ² /s]
ε	emissiefactor	[-]
ρ	dichtheid	[kg/m ³]
σ	spanning, Stefan Boltzmann constante	[V],[W/(m ² ·K ⁴)]
τ _d	dempingsconstante voor regelaar	[-]
τ _i	integratieconstante voor regelaar	[-]
φ	hoek	[rad] of [°]
ψ	Fasemarge	[rad] of [°]
ω	hoeksnelheid	[rad/s ²]

Indices en afkortingen

max	maximaal
min	minimaal
TSF	van de TSF koppelsensor
e	natuurlijke
uit	uitgaande
in	ingående
best	besturing
bew	beweging
em	elektro-magnetisch
spo	spoel
enc	encoder
sp	spier
pas	passief
stim	stimulatie
g	gewenst
x	in de richting van
y	in de richting van
z	in de richting van
HRS	hoge resolutie servosysteem
LRS	lage resolutie servosysteem
fas.m.	fase marge
amp.m.	amplitude marge
acc	versnelling
sch	meetschijf
pl	meetplaatje
conv	convectie
str	straling
ben	benodigd

1 Inleiding

1.1 Het Onderzoek

De afgelopen jaren is bij een groot aantal mensen ontdekt, dat bij inspanning de spieren uitzonderlijk snel vermoeid raken. Naar dit verschijnsel wordt wetenschappelijk onderzoek verricht onder de noemer inspanningstolerantie. Hieruit is gebleken dat verschijnselen met betrekking tot de inspanningstolerantie vaak gelegen zijn in een defect van één of meerdere enzymen in de energiehuishouding van de skeletspier. De vermoeiing kan bijvoorbeeld veroorzaakt worden door een ziekte waarbij sprake is van een zodanig defect, zoals Diabetes.

Om de invloed van deze defecten te kunnen bestuderen is er op initiatief van Prof. Dr. G.J. van der Vusse van de vakgroep fysiologie een promotie-project gestart tussen de Technische Universiteit Eindhoven en de Universiteit Maastricht. Het doel van het project is het ontwikkelen van een experimenteel model ter bepaling van de invloed van stofwisselingsdefecten op het mechanisch functioneren van de skeletspier. Binnen dit multidisciplinaire project participeren van de kant van de Technische Universiteit Eindhoven de groep Constructies en Mechanismen van de leerstoel Precision Engineering en de vakgroep Fundamentele Werktuigbouwkunde. Van de kant van de Universiteit Maastricht participeren de vakgroep Bewegingswetenschappen en de vakgroep Fysiologie. Het project maakt deel uit van een onderzoeksprogramma getiteld 'Functie en dysfunctie van de skeletspier', waaraan momenteel zeven Assistenten In Opleiding werken. Het doel binnen dit onderzoeksprogramma is het vergroten van het inzicht in de fysische en de biochemische werking van de normale en pathologische (=zieke) skeletspier, zowel bij normale belasting als bij belastingen leidend tot structurele en functionele veranderingen, zoals schade en adaptatie (=aanpassing).

Het onderzoek naar de effecten van deze defecte enzymen kan biochemisch, fysiologisch en biomechanisch van aard zijn. In de biochemie worden de chemische processen bestudeerd die zorg dragen voor de omzetting van energie uit de voedingsstoffen in een voor het contractiemechanisme van de spier bruikbare vorm. Het systeem van de spier waarbinnen deze omzetting plaatsvindt wordt ook wel het energiemetabolisme genoemd.

De fysiologie bestudeert de typisch biologische eigenschappen van de spier, zoals bijvoorbeeld uithoudingsvermogen en spierschade. De biomechanica verricht onderzoek naar de mogelijkheid om de spier te beschrijven en voorspellingen te doen met behulp van mechanische parameters en legt relaties zoals bijvoorbeeld de krachtleverantie als functie van de spierlengte. Biochemisch zijn effecten als gevolg van stofwisselingsdefecten relatief goed bestudeerd. Van de fysiologische en biomechanisch gevolgen is echter nauwelijks iets bekend. De reden daarvoor is het niet voorhanden zijn van goede meetapparatuur voor de bestudering van het fysiologische en mechanische gedrag van skeletspieren.

Er zijn ruwweg drie manieren om onderzoek te verrichten naar het mechanisch gedrag van skeletspieren. De volgende onderverdeling in experimenten is te maken:

- In situ experimenten. De spier wordt bij de Achillespees doorgenomen en met een krachtsensor verbonden. Het andere uiteinde van de spier blijft ongewijzigd aan het bot gehecht. (Brooks et al, 1990)
- In vitro experimenten. De spier wordt in zijn geheel uitgenomen en in een temperatuur beheerst bad beproefd. Aan één zijde wordt een aandrijving bevestigd en aan de andere zijde een krachtsensor. (James et al, 1995)
- In vivo experimenten. Het proefdier blijft tijdens de experimenten intact. (Ashton-Miller et al, 1992)

Voor fysiologisch onderzoek zijn alleen de in vivo experimenten geschikt vanwege de voor het proefdier fysiologische omstandigheden.

Een bijzonder geschikt onderzoeksobject is de muis. Met de hedendaagse moleculair biologische technieken is het mogelijk om muizenstammen te kweken, die een over- of onderexpressie van bepaalde enzymen vertonen en dus defecten in de stofwisseling hebben, de zogenaamde transgene muizen. Eén van de eisen welke aan het experimentele model worden gesteld is dat het geschikt is voor het bestuderen van de skeletspieren van muizen.

Dit rapport beschrijft de afstudeeropdracht van het ontwerp van een meetinstrument, dat geschikt is voor onderzoek aan skeletspieren van muizen. Deze afstudeeropdracht is uitgevoerd onder de begeleiding van dr. ir. P.C.J.N. Rosielle van de leerstoel Precision Engineering en onder de begeleiding van dr. ir. M.R. Drost van de vakgroep Bewegingswetenschappen.

Een soortgelijk meetinstrument voor muizen is eerder ontworpen door J.A. Ashton-Miller (Ashton-Miller et al, 1992). In de vakgroep Bewegingswetenschappen wordt door Drs. M. Hesselink onderzoek gedaan naar spierschade met een soortgelijk meetinstrument voor ratten. Dit meetinstrument is ontworpen door Ir. E. Dekkers van de Centrale Technische Dienst van de Technische Universiteit Eindhoven.

Voor de ontwikkeling van het meetinstrument is het noodzakelijk randvoorwaarden te stellen. Deze randvoorwaarden worden bepaald aan de hand van de voor het onderzoek relevante relaties. Uit de spiertheorie blijkt dat de geleverde kracht van een spier afhankelijk is van de lengte en reksnelheid van de spier. Ook is onderscheid aan te brengen in verschillende soorten spieren. In dit hoofdstuk zal de theorie van skeletspiercontractie kort beschreven worden. Vervolgens komt het verschil in skeletspiervezeltypes aan de orde. Aan de hand van deze spiertheorie is tenslotte een eisenpakket opgesteld waaraan het meetinstrument dient te voldoen.

1.2 Een beschrijving van de skeletspiercontractie

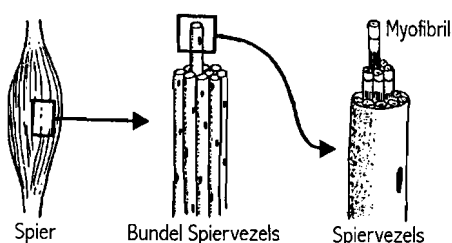
Spieren stellen ons in staat in leven te blijven, krachten te leveren en inspanningen te verrichten die we tijdens het dagelijks leven nodig hebben. Deze verschillende functies hebben als gevolg dat de spieren verschillende kenmerken hebben en er een onderverdeling te maken is in soorten spieren. Een eerste ruwe onderverdeling in spierweefsel kan gemaakt worden in glad spierweefsel, bijvoorbeeld de spiergroepen die aanwezig zijn in de vaatwanden of de darmen, en dwarsgestreept spierweefsel, bijvoorbeeld de skeletspier en de hartspier (Guyton, 1984).

Skeletspierweefsel vormt een complex orgaansysteem, dat 40-50% van het lichaamsgewicht uitmaakt. Een optimale spierwerking vereist dat allerlei deelfuncties, zoals mechanische krachtleverantie, elektrische aansturing, doorbloeding en metabolisme, goed functioneren, goed op elkaar afgestemd zijn, en goed afgestemd zijn op de functionele eisen van buitenaf, de externe belasting.

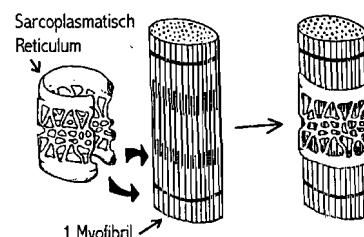
De mechanische krachtleverantie vereist een optimale organisatie van de krachtgenererende (de individuele spiercellen) en krachtdoorleidende (bindweefsel, pezen) elementen. De krachtgeneratie vindt plaats na aansturing van de spiervezels vanuit het zenuwstelsel. De mate van krachtgeneratie hangt onder andere af van de lengte en reksnelheid van de vezel. Deze relatie zal in de volgende paragrafen gelegd worden aan de hand van een beschrijving van het contractiemechanisme.

1.2.1 De opbouw van een skeletspier

De skeletspier bestaat uit langgerekte veelkernige cellen die spiervezels genoemd worden. Elke spiervezel is opgebouwd uit kleinere subunits. Het celmembran van deze spiervezels wordt Sarcolemma genoemd. Het Sarcolemma omsluit de cellulaire inhoud, bestaande uit de kern en het cytoplasma (Sarcoplasma). In het Sarcoplasma bevinden zich ondermeer buisvormige structuren, die het Sarcoplasmatisch Reticulum genoemd worden. Dit is een lichaam waarin Calcium opgeslagen zit, dat vrijkomt tijdens een contractie. Het staat dan Ca^{2+} af aan het celsap en na de contractie neemt het weer Ca^{2+} op uit de intercellulaire ruimtes. Verder bevinden zich in het Sarcoplasma de zogenaamde Myofibrillen (figuur 1.1). Het Sarcoplasmatisch Reticulum loopt door de cel om de Myofibrillen heen (figuur 1.2).

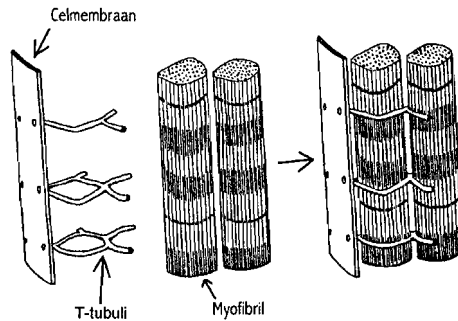


Figuur 1.1 Het Sarcoplasmatisch Reticulum



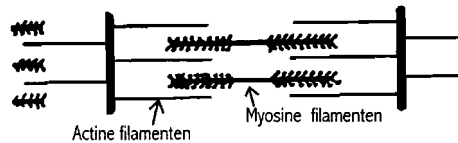
Figuur 1.2 De relatie tussen spieren, spiervezels en Myofibrillen

De skeletspier kan contraheren wanneer een elektrische prikkel van de zenuw de spiervezel binnenkomt. De zenuw mondt uit op het celmembraan, die uitstulpinkjes naar binnen heeft, de T-tubuli (figuur 1.3). Het actiepotentiaal van de zenuw loopt over het celmembraan door de T-tubuli de spiervezel binnen, om zo het Sarcoplasmatisch Reticulum te activeren.



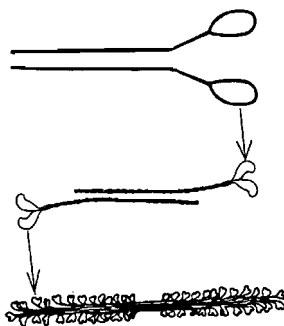
Figuur 1.3 Ligging van de T-tubuli om de Myofibrillen

De Myofibrillen bevatten de eiwit-elementen, Myosine en Actine, die voor de uiteindelijke contractie zorgen. De Myosine- en Actine-elementen zijn langvormig, waarbij de Myosine dikker is dan de Actine. Omdat ze deze vorm hebben worden ze ook wel de dikke en de dunne filamenten genoemd. De filamenten liggen onderling parallel en in elkaar geschoven zoals schematisch weergegeven is in figuur 1.4. In de rust situatie verkeren de Actine filamenten gedeeltelijk tussen de Myosine filamenten. Wanneer nu de spier als het gevolg van een elektrische prikkel van de zenuw contraheert, worden de Actine filamenten tussen de Myosine filamenten getrokken.

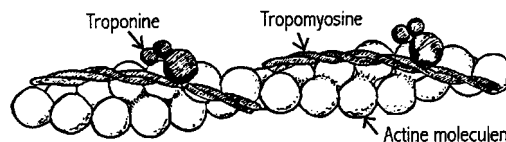


Figuur 1.4 De ligging van de Myosine en Actine filamenten

De Myosine filamenten bestaan uit een soort koppen met lange staartachtige delen, die in elkaar gedraaid zitten (figuur 1.5). In rust liggen deze koppen tegen het Actine filament aan. Het Actine filament bestaat uit drie verschillende componenten: Actine moleculen, Troponine en Tropomyosine, waarbij de Actine moleculen de ruggegraat van de Actine filamenten vormen (figuur 1.6).



Figuur 1.5 Opbouw van het Myosine filament



Figuur 1.6 Opbouw van een Actine filament

1.2.2 De beschrijving van het contractie-mechanisme

De contractie van een spier vindt plaats na aansturing vanuit het zenuwstelsel. Over de zenuw loopt een elektrische prikkel naar het celmembraan, en komt via de T-tubuli de spiervezel binnen. Het elektrisch signaal

kan op deze wijze het Sarcoplasmatisch Reticulum activeren. Deze scheidt Calcium-ionen uit die beschouwd kunnen worden als teken voor de spier om te contraheren.

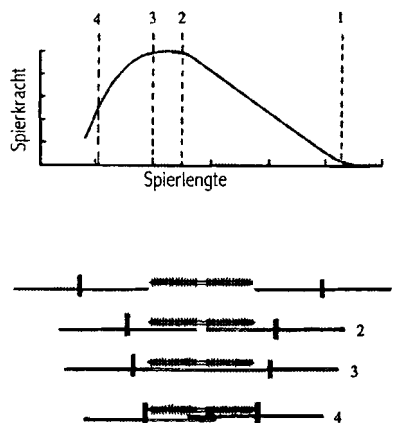
De Calcium-ionen binden aan het Troponine, waardoor er een chemische reactie plaatsvindt. Deze reactie heeft tot gevolg dat er actieve bindingsplaatsen van de Actine-moleculen vrij komen. De kopgedeelten van het Myosine worden door deze actieve Actine plaatsen aangetrokken. Op deze manier ontstaan er zogenaamde 'Cross-bridges', bindingen tussen actieve Actine plaatsen met de kopgedeelten van de Myosine filamenten. Deze brugvorming heeft een standsverandering van de Myosine moleculen tot gevolg, die op hun beurt de Actine filamenten verplaatsen. De Cross-bridge vorming wordt nu verbroken en de Myosine koppen binden aan een volgende actieve Actine plaats. Dit fenomeen herhaald zich totdat de zenuwprickeling verdwenen is. Het contractie-mechanisme wordt de 'sliding filament theory' genoemd (Huxley et al., 1954).

Dit proces van voortbewegen kost de spiervezel energie en deze energie komt vrij door het verbreken van de fosfaatbinding van het molecuul Adenosine Trifosfaat waardoor Adenosine Difosfaat ontstaat volgens de reactie: **ATP → ADP + Pi + energie**. Dit ATP wordt geproduceerd door de glycolytische omzetting van glucose in Lactaat (melkzuur) en/of de oxidatieve fosforylering in de Mitochondriën die zich eveneens in het Sarcoplasma bevinden.

Wanneer de spiervezel niet meer gestimuleerd wordt, worden de calcium ionen vanuit het Sarcoplasma teruggepompt in het Sarcoplasmatisch Reticulum, zodat de actieve plaatsen van de Actine moleculen weer door het Troponine bedekt worden. Dit heeft tot gevolg dat de Myosine koppen niet meer kunnen binden en de spiercontractie stopt. De spiervezel keert weer terug naar zijn oorspronkelijke lengte (Guyton, 1984).

1.2.3 De relatie tussen de krachtleverantie en de spierlengte

De mate van overlapping van de Myosine en Actine filamenten bepaalt hoeveel Cross-bridges er kunnen ontstaan. Dit betekent dat de kracht die een spier kan leveren van de lengte van die spier afhangt. In figuur 1.7 is dit weergegeven in een grafiek met daarbij de mate van overlapping van de Myosine en Actine filamenten. Een eerste eis voor het meetinstrument is dat met het instrument de relatie bepaald moet kunnen worden tussen spierlengte en spierkracht.

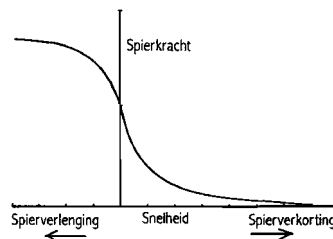


Figuur 1.7 De kracht-lengte curve van een skeletspier. Daaronder de mate van overlapping van de Myosine en Actine filamenten

Het kunnen bepalen van deze relatie is zeer belangrijk voor bijvoorbeeld het kunnen vaststellen van eventuele vermindering van de geleverde spierkracht door defecten in de stofwisseling. Deze vermindering heeft de grootste absolute waarde bij de spierlengte waarbij de maximale spierkracht geleverd wordt. Deze moet met het meetinstrument vastgesteld kunnen worden.

1.2.4 De relatie tussen krachtleverantie en reksnelheid

Ook is spierkracht afhankelijk van de snelheid van verlenging en verkorting van spiervezels (figuur 1.8). Dit heeft namelijk invloed op de manier waarop de Cross-bridges gevormd worden en op de vervorming van het Myosine filament. Om de invloed van deze snelheid vast te stellen moet met het te realiseren meetinstrument een voorgeschreven snelheid van spierverlenging en -verkorting gerealiseerd kunnen worden. Dit is een tweede eis voor het meetinstrument. Deze gegevens bieden de mogelijkheid de verrichte bewegingsarbeid en daaruit het vermogen van de spier te berekenen.



Figuur 1.8 De maximale kracht van een skeletspier tijdens verlenging en verkorting van de spier

1.3 Elektrostimulatie van de spier

Door middel van elektrostimulatie op de zenuw is een spier te stimuleren. De stimulatie vindt plaats met behulp van twee elektroden met een potentiaalverschil. De elektroden kunnen op de volgende manieren aangebracht worden:

1) Stimulatie via de zenuw

De stimulatie via de zenuw lijkt het meest op de fysiologische stimulatie van de spier. Het actiepotentiaal dat over de zenuw loopt komt zeer homogeen via de zenuwvertakkingen de spier binnen en kan zo alle vezels tegelijk aanslaan.

- Twee draad-elektroden worden beiden om de zenuw gelegd. Dit is een invasieve methode, omdat een kleine chirurgische ingreep noodzakelijk is om de zenuw te bereiken en omdat de zenuw beschadigd wordt. Er is een zeer lage spanning nodig (± 0.5 Volt) om een maximale spiercontractie te veroorzaken.
- Twee naald-elektroden worden in de buurt van de zenuw gestoken. Dit is de minst invasieve methode. Het aanbrengen van de elektroden op de juiste plaats vereist enige vaardigheid en ervaring. Bij verschillende dieren ligt de zenuw niet altijd op dezelfde plaats. Door middel van stimulatie wordt bepaald of de elektroden goed aangebracht zijn. Eenmaal aangebrachte elektroden kunnen door een lichte aanraking of door de spiercontractie zelf eenvoudig van positie veranderen. De elektroden worden daarom vaak op de huid gelijmd. Er is een hogere spanning ($\pm 2.5\sim 3$ Volt) nodig dan bij mogelijkheid 1a. Hierdoor bestaat de mogelijkheid dat ook andere spieren contraheren.
- Eén draad-elektrode wordt aangebracht om de zenuw en één naald-elektrode wordt aangebracht in de spier. Dit is de meest invasieve methode. Het aanbrengen van een draad-elektrode om de zenuw van een muis is een tijdrovende en nauwkeurige bezigheid. Bij een muis is deze methode dus te prefereren boven mogelijkheid 1a. Er is echter een hogere spanning nodig ($\pm 2.5\sim 3$ Volt) om een maximale spierkracht te verkrijgen dan bij mogelijkheid 1a. Hierdoor bestaat de mogelijkheid dat ook andere spieren contraheren.

2) Stimulatie op de spier

Er worden twee naald-elektroden aangebracht aan beide uiteinden van de spier, waardoor bij een potentiaalverschil een stroom gaat lopen door de spier. Stimulatie op deze manier wijkt duidelijk af van de fysiologische stimulatie van de spier. De slechtere geleiding in de spier resulteert in een situatie dat de spiervezels niet homogeen worden aangeslagen. De stijgtijd van de spierkracht bij het aanslaan van de spier naar een maximaal niveau zal groter zijn dan bij stimulatie via de zenuw. Deze methode vraagt het grootste potentiaalverschil ($\gg 3V$) voor een maximale spiercontractie.

De spier wordt gestimuleerd door met een bepaalde frequentie spanningspulsen van een bepaalde grootte over de elektroden te zetten. Een contractie bij één puls noemt men een twitch. Door meerdere pulsen aan te bieden kunnen zich meerdere twitches opstapelen tot een zogenaamde tetanische contractie ontstaat. De spanning moet zodanig zijn dat deze minimaal is bij een maximale spierkracht (de supramaximale spanning), omdat anders de

spiervezels niet tegelijk en in een verkeerde volgorde aangeslagen worden ('Reversed Recruitment' (Fang et al, 1991)). Met een verlaging van de frequentie van de spanningpulsen (de stimulatiefrequentie) kan de spierkracht worden teruggebracht.

Stimulatie tijdens verkorting van de spier noemt men concentrisch stimuleren, tijdens verlenging van de spier excentrisch stimuleren, en bij gelijkblijvende lengte isometrisch stimuleren.

1.4 Het skeletspier vezeltype

Spiervezels onderling vertonen verschillen qua structuur, stofwisseling en functionele eigenschappen. De spiervezels kunnen grofweg in twee groepen verdeeld worden en hebben een aantal benamingen. De ene groep bevat de snelle (fast twitch glycolytische, type IIB) vezels en de andere groep bevat de langzame (slow-twitch oxidatieve, type I) spiervezels (Mc Ardle et al., 1991). Er is een derde groep spiervezels (fast-twitch oxidatieve-glycolytische, type IIA), die intermediaire eigenschappen vertonen. Deze structurele, functionele en biochemische verschillen tussen de verschillende 'groepen' spiervezels zijn weergegeven in tabel 1.1.

Tabel 1.1 Klassificatie van skeletspiervezels (van Breda, 1994)

Soort vezels		Langzaam (type I)	Intermediair (type IIA)	Snel (type IIB)
Structuur	Vezeldiameter	Klein	Gemiddeld	Groot
	Aantal haarvaten	Veel	Gemiddeld	Weinig
Energie vorm		Oxidatieve fosforylering	Oxidatieve fosforylering	Glycolyse (anearoob)
Functioneel		Duur bewegingen	Middellange duur bewegingen	Snelle, krachtige bewegingen
Voorbeelden		Soleus (Kuitspier)	Vastus Lateralis (Bovenbeenspier)	EDL (Scheenspier) Tibialis (Scheenspier)

Bij onderzoek naar stofwisselingsdefecten is het van belang dat er een onderscheid gemaakt wordt tussen deze spiervezel types. Het meetinstrument moet deze verschillende eigenschappen kunnen onderzoeken. Concreet betekent dit dat met behulp van het te realiseren meetinstrument zowel de kuitspier (type I en IIA) als de scheenspier (type IIB) onderzocht moet kunnen worden.

1.5 De ontwerpeisen voor het meetinstrument

1.5.1 De algemene eisen

Uit paragraaf 1.2 en 1.3 zijn de volgende eisen naar voren gekomen:

- De spierlengte moet gevarieerd kunnen worden om zodoende de relatie tussen spierlengte en spierkracht te bepalen. Dit betekent dat er statisch (isometrische stimulatie) gemeten moet kunnen worden.
- De snelheid van vezellengte verandering moet nauwkeurig opgelegd kunnen worden, om de relatie tussen spierkracht en reksnelheid te bepalen. Dit betekent dat er ook dynamisch (excentrische en concentrische stimulatie) gemeten moet worden.
- Er moet gemeten worden aan de scheen- en de kuitspier.

1.5.2 De specificaties

De algemene eisen dienen gerealiseerd te worden met de volgende specificaties:

De meting van de spierkracht

- De werkwijze
Het koppel om de enkelas als gevolg van een spierkracht van de scheen- en kuitspier dient gemeten te worden.
- De nauwkeurigheid
Gestreefd wordt naar een meetonnauwkeurigheid van 1% van het maximale koppel van de te meten spier.

Deze wens van hoge nauwkeurigheid komt voort uit het feit dat er ook gemeten moet kunnen worden aan vermoeide spieren die een veel lager maximaal spierkoppel leveren.

- Het meetbereik

Een afschatting van het benodigde meetbereik bij de verschillende soorten metingen is weergegeven in tabel 1.2.

Tabel 1.2 Een afschatting van de maximale spierkoppels ten behoeve van het eisenpakket

Spier	Stimulatie	Maximaal spierkoppel [mNm]
Scheenspier	Concentrisch	± 3.8
	Isometrisch	± 4.0
	Excentrisch	± 7.6
Kuitspier	Concentrisch	± 19.1
	Isometrisch	± 19.9
	Excentrisch	± 38.3

Deze tabel is tot stand gekomen met behulp van onderstaande gegevens:

- * In literatuur (Lowe et al., 1995) zijn de volgende maximale spierkoppels gevonden die door muizen geleverd kunnen worden
 - isometrisch stimulatie van scheenspieren 2.9 mNm (standaard deviatie ± 0.4 mNm)
 - excentrische stimulatie van scheenspieren 5.7 mNm (standaard deviatie ± 0.6 mNm).
 Om het koppel van alle soorten muizen te kunnen meten, wordt bij deze maximale waarden 3 maal de standaard deviatie opgeteld.
- * Tijdens eerste experimenten met muis zijn onderstaande maximale spierkoppels gemeten
 - isometrisch stimulatie van scheenspieren ± 3.5 mNm
 - isometrisch stimulatie van kuitspieren ± 19 mNm
 Enkele resultaten van deze experimenten zijn terug te vinden in bijlage 1 ('De muisexperimenten').
- * Uit de resultaten van experimenten met ratten is gebleken dat bij ratten de kuitspier ongeveer vijf maal zoveel kracht kan leveren als de scheenspier (Hesselink). Tevens is bij deze experimenten gebleken dat het maximale spierkoppel tijdens excentrische stimulatie twee maal zo groot is als het maximale spierkoppel tijdens concentrische stimulatie.

De spierlengte verandering

- De werkwijze

Om de scheen- en kuitspier in lengte te variëren moet de voet van de muis om de enkelas geroteerd kunnen worden ten opzichte van het onder- en bovenbeen van de muis.
- De nauwkeurigheid

De voethoek moet op 1° instelbaar zijn.
- De slag en de snelheid

Voor de statische metingen is een slag van de voethoek vereist van minimaal 120° . Bij dynamisch meten dient de voethoek sinusvormig te verlopen. Uit video-analyses is gebleken dat de voortbewegingsvormen redelijk goed met deze sinusvormige beweging overeen komen (James et al., 1992; Nicolopoulos-Stournaras et al, 1984). Tevens is gebleken dat de muis twee bewegingssnelheden heeft, draf en galop. De frequentie van deze bewegingen is resp. 5.9 Hz en 8.2 Hz. Deze moeten ook door het meetinstrument gerealiseerd kunnen worden. Het bereik van de voethoek waarbinnen de sinusbeweging gerealiseerd wordt dient minimaal 120° te zijn. Binnen deze hoek moet de beweging plaatsvinden met een amplitude van maximaal 45° .

De stimulatie van de zenuw

Deze wordt uitgevoerd met behulp van de reeds aanwezige spierstimulator. De stimulatie dient gesynchroniseerd te worden met de sinusvormige beweging van de voethoek.

De overige eisen

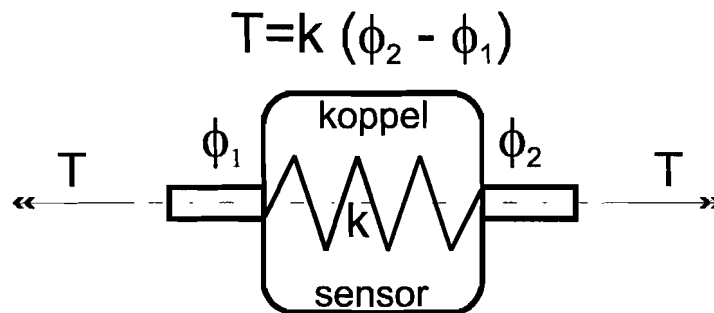
Het aantal chirurgische ingrepen dient tot een minimum beperkt te worden. In tegenstelling tot conventionele opstellingen moet er de mogelijkheid zijn chronische experimenten uit te voeren. Dit zijn herhalingsexperimenten waarbij met één muis gebruikt wordt. Deze eis komt voort uit de wens van evaluatie van trainingsprotocollen.

1.6 De opbouw van het verslag

Er bestaan verschillende concepten om een koppel te meten, het elastisch concept en het mechatronisch concept. In hoofdstuk 2 zullen verschillende ontwerpen behandeld worden gebaseerd op het elastisch concept. Van deze ontwerpen zal een beschouwing worden gegeven van de bewegingsnauwkeurigheid en de meetnauwkeurigheid van de ontwerpen. In hoofdstuk 3 zal het mechatronisch concept uitgediept worden aan de hand van verschillende ontwerpen en een modelering van deze ontwerpen. In hoofdstuk 4 wordt de constructie besproken van de fixatie van de muis. Hier komen ook experimenten die met een prototype van de fixatie zijn uitgevoerd aan bod. In hoofdstuk 5 zal het totaalontwerp met de verschillende constructies uit de voorafgaande hoofdstukken worden gepresenteerd. Hoofdstuk 6 geeft de eindconclusies.

2. Elastisch koppel meten

Een koppel kan gemeten worden door de hoekverdraaiing van een elastisch element, met een bekende rotatiestijfheid k en onder belasting van een koppel T , te meten (figuur 2.1). De hoekverdraaiing is lineair afhankelijk van het koppel volgens de relatie $T=k \cdot \Delta\phi$. Deze methode van koppelmetering wordt relatief veel gebruikt. Er zijn sensoren op de markt met dit werkingsprincipe.



Figuur 2.1 Elastisch koppel meten

Om nauwkeurig een koppel te meten is het volgende van belang:

- Het hoekverschil moet nauwkeurig bekend zijn,
- De rotatiestijfheid k moet bekend en constant zijn,
- Geen andere koppels (bijvoorbeeld vanwege wrijving of versnelling van de massa's) mogen het hoekverschil $\Delta\phi$ beïnvloeden.

Bij een hoge stijfheid veroorzaakt een koppel een klein hoekverschil. Een hoge stijfheid stelt dus hoge eisen aan de hoekmeting en is voor de hoekmeting dus ongunstig. Voor het vastleggen van de hoek ϕ_1 met behulp van de hoek ϕ_2 is het tegenovergestelde echter het geval. Ook dynamisch heeft een hoge stijfheid voordelen, omdat de laagste eigenfrequentie van het totale instrument erdoor verhoogd wordt. De combinatie van meten, positioneren en aandrijven vraagt hier om tegenstrijdige stijfheden.

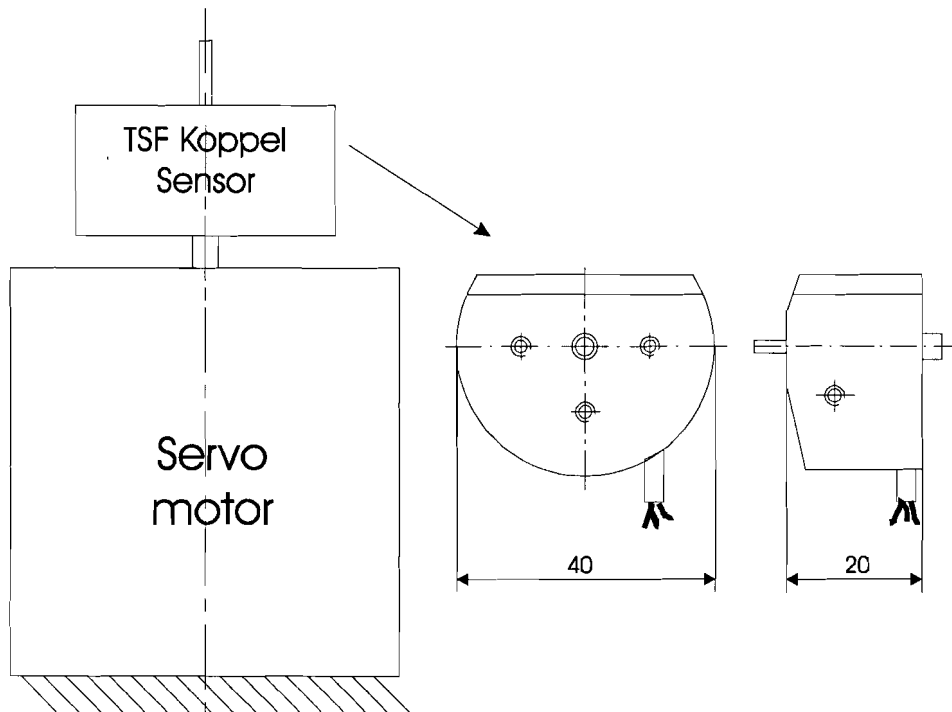
De minimaal te meten hoekverdraaiing en dus de maximaal te behalen stijfheid is afhankelijk van de manier waarop de hoekverdraaiing gemeten kan worden. De vervorming van het elastische deel van een koppelsensor kan gemeten worden door middel van rekmeting en verplaatsing. Rekmeting gebeurt in het algemeen met behulp van rekstrookjes. De mogelijkheden om nauwkeurig een verplaatsing te meten zijn veel groter. Om wrijving en de hiermee gepaard gaande ongewenste hysteresis te vermijden zijn contactloze inductieve sensoren een interessante optie. De inductieve sensoren hebben een hoge resolutie (0.1 %) en zijn eenvoudig te monteren.

In dit hoofdstuk worden twee ontwerpen van een koppelsensor besproken met een beschouwing voor de aandrijving van deze koppelsensoren. Het eerste ontwerp is een koppelsensor van CSEM Instruments. Het tweede ontwerp is een eigen ontwerp van een koppelsensor. Van deze ontwerpen zullen de nauwkeurigheden geanalyseerd worden. Vervolgens worden de voor- en nadelen van de ontwerpen vergeleken.

2.1 Koppelsensor ontwerp I

In het eerste ontwerp is gebruik gemaakt van een op de markt verkrijgbare koppelsensor. Na uitgebreid marktonderzoek is de TSF-koppelsensor van CSEM Instruments in Zwitserland naar voren gekomen als koppelsensor met de hoogste onnauwkeurigheid van ongeveer 1% en de grootste resolutie van <0.1%. Gegevens van de koppelsensor zijn terug te vinden in bijlage 2 ('Specificaties van de koppelsensoren en van de inductieve sensoren').

Het ontwerp is schematisch weergegeven in figuur 2.2. Een servomotor legt de hoek van de ingaande as van de koppelsensor vast. De uitgaande as van de koppelsensor legt de hoek van de muizevoet vast.



Figuur 2.2 Koppelsensor ontwerp I

2.1.1 De servomotor

Voor de aandrijving is een servo-positiesysteem gekozen. Met een servosysteem kan een zeer hoge positioneer-nauwkeurigheid en snelheids-nauwkeurigheid bereikt worden.

Voor een servosysteem c.q. positioneersysteem zijn de volgende componenten nodig:

- een DC-gelijkstroommotor
- een positiemeetsysteem
- een motorversterker
- een positioneerbesturing

De DC-gelijkstroommotor is van grote invloed op de afmetingen van de constructie. De grootte van deze motor wordt bepaald door het lastkoppel. Dit lastkoppel kan worden berekend aan de hand van de maximaal optredende rotatieversnelling, de massa draagheid van het roterende gedeelte, het maximaal te leveren koppel door de muis en de stijfheid van de bedrading.

De massa draagheid van de sensor is niet bekend. Hiervoor wordt een bovenschatting gemaakt door 75 % van de massa draagheid van een massieve aluminium cilinder met een diameter van 40 mm en een hoogte van 15 mm te berekenen.

$$J_{\text{TSF}} = \frac{1}{2} MR^2 \cdot 0.75 = 7.634 \cdot 10^{-6} \left[\text{kg m}^2 \right]$$

In bijlage 3, 'De optredende voetsnelheden en versnellingen', zijn de optredende snelheden en versnellingen berekend. De maximale versnelling volgt uit de maximale amplitude (45°) en de frequentie van de sinusbeweging van de voet (8.5 Hz). Uit formule B3.3 in deze bijlage volgt voor de maximale rotatieversnelling:

$$\dot{\omega} = 4\pi^2 f^2 A = 2240 \left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}^2} \right]$$

Het benodigde maximale koppel voor de versnelling van de massa draagbaarheid is:

$$T_{\max} = J_{\text{TSF}} \cdot \dot{\omega}_{\max} = 17 \cdot 10^{-3} \text{ [Nm]}$$

Deze waarde vermeerderd met het maximale kuitspieroekoppel van ± 40 mNm levert een totaal lastkoppel van 60 mNm. Om de massa draagbaarheid van de motor (aanname: $70 \cdot 10^{-7}$ [kg·m²], een gemiddelde waarde bepaald uit catalogi voor motoren die een koppel van 80~90 mNm kunnen leveren) te versnellen en de stijfheid van de bedrading te overwinnen (aanname: 5 mNm), moet bij het bepaalde lastkoppel nog een waarde van 20 mNm worden opgeteld. Een motor is gekozen met een maximaal te leveren koppel van 80 mNm.

2.1.2 De keuze van het sensortype

De keuze van de sensor hangt af van het koppelbereik waarin gemeten wordt. Wanneer er dynamisch gemeten wordt met één instrument en één sensor, dan is een bereik gewenst van 40 mNm. Een dergelijke sensor is niet opgenomen in het standaardpakket van de fabrikant, maar kan wel geleverd worden. Vanwege de lineariteitsfout en hysteresis van de TSF koppelsensoren wordt de onnauwkeurigheid van 1% van het maximale scheenspieroekoppel echter niet gehaald.

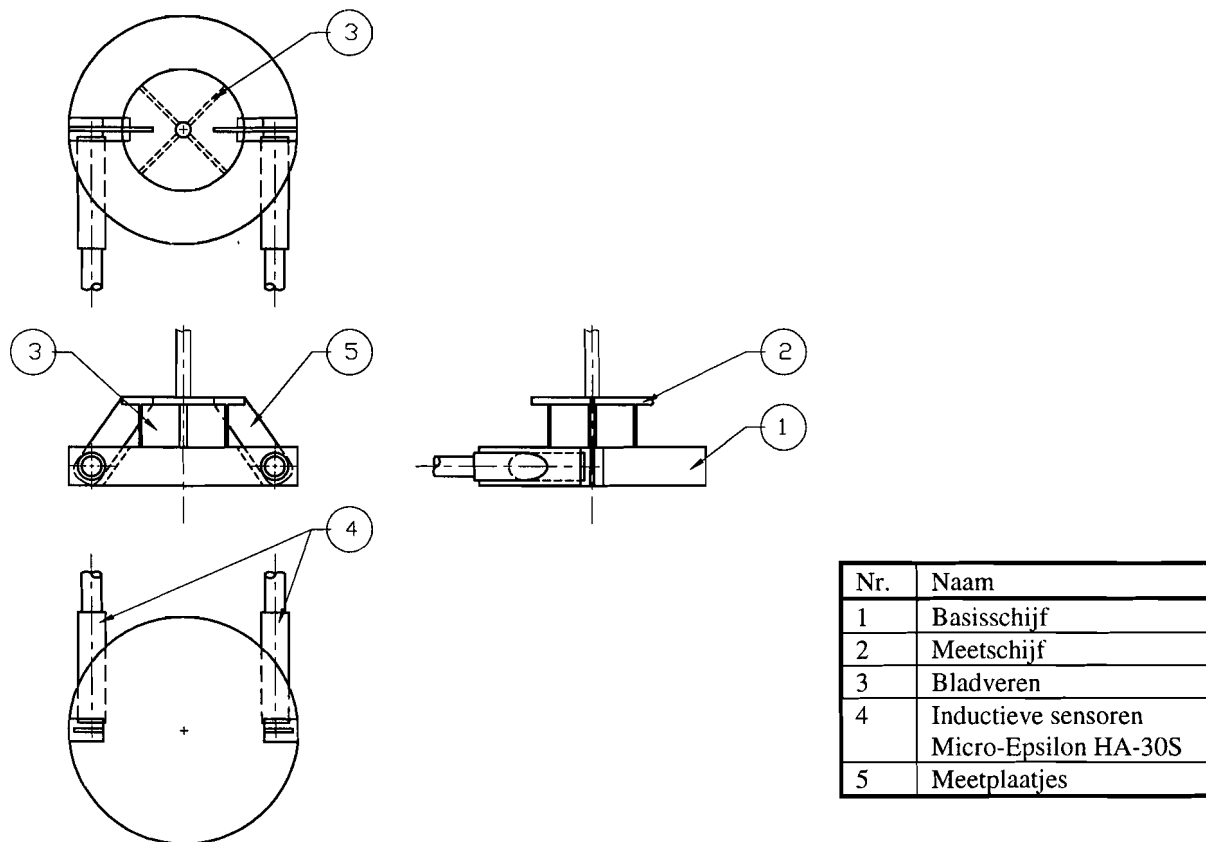
Met gebruik van twee sensoren wordt de nauwkeurigheid aanzienlijk verhoogd. Eén sensor wordt gebruikt voor het meten aan de kuitspier, de andere voor het meten aan de scheenspier. Aangezien de scheenspier een maximaal excentrisch koppel levert van ± 7.6 mNm, is de sensor type TSF-1 de beste keuze (bijlage 2). Door kalibratie wordt de afwijking door de lineariteitsfout gereduceerd.

2.2 Koppelsensor ontwerp II

Het tweede ontwerp is gebaseerd op een zelf ontworpen koppelsensor. Deze sensor is weergegeven in figuur 2.3.

De sensor bestaat uit twee schijven (1 en 2) met daartussen vier bladveren (3), radiaal geplaatst (Constructieprincipes). Door deze bladveren zijn de schijven rotatieslap met elkaar verbonden. In de onderste schijf (1) zijn twee inductieve sensoren (4) aangebracht (de 'basisschijf'), in de bovenste schijf (2) zijn twee plaatjes (5) aangebracht (de 'meetschijf'). De sensoren kunnen een verplaatsing van de plaatjes waarnemen. Door twee sensoren toe te passen is het mogelijk om een rotatie te onderscheiden van een eventuele translatie, en hiermee een koppel van een kracht te onderscheiden.

Voor het realiseren van de sensor worden van een stalen as eerst de buitenafmetingen gedraaid. Na het draaien kunnen de gleuven voor de meetplaatjes en de gaten voor de inductieve sensoren worden aangebracht. Om interne spanningen en eventuele hysteresis te vermijden moeten vervolgens de bladveren uitgevonkt worden. Twee tegenover elkaar liggende bladveren kunnen met behulp van vonken, zonder dat de koppelsensor omgesteld hoeft te worden, in één keer gevonkt worden. Pas na het omstellen van de sensor voor het vonken van de andere twee bladveren ligt de rotatiepool van de sensor vast. Omdat, ten behoeve van de lineariteit, de symmetrie van de sensor zo goed mogelijk behouden moet blijven, moet de pool in een cirkel met een straal van 50µm van de as van de sensor liggen. Dit is <1% van de straal van de meetschijf (7 mm). Tenslotte kunnen de stalen meetplaatjes en de inductieve sensoren in de basisschijf geklemd of gelijmd worden.



Figuur 2.3 Koppelsensor eigen ontwerp, schaal 1:1

2.2.1 De optimalisatie van de dimensies

2.2.1.1 De bepaling van de benodigde rotatiestijfheden

De rotatiestijfheid van de sensor is afhankelijk van het gewenste meetbereik van het koppel, het meetbereik van de sensor en de straal waarop de sensor zit. Gekozen is voor inductieve sensoren van Micro-Epsilon (bijlage 2), die een meetbereik van 0.4 mm hebben. Omwille van de compactheid en een lage massa draagheid ten behoeve van het lastkoppel voor de aandrijving is gekozen voor een diameter van de koppelsensor van 30 mm. De as van de inductieve sensoren bevindt zich dan op een straal van 12 mm.

Er zijn vier koppelsensoren ontworpen met een verschillend meetbereik van het koppel. Een onderscheid wordt gemaakt tussen metingen aan de scheen- en de kuitspier, en metingen tijdens een concentrische en een excentrische stimulatie van de spier. Omdat zowel een positief als een negatief koppel gemeten moeten kunnen worden is de maximale verplaatsing van de meetplaatjes ter plekke van de inductieve sensoren gelijk aan de helft van het totale bereik van de inductieve sensoren, namelijk 0.2 mm. De straal waarop de inductieve sensor zit is gelijk aan 12 mm en levert dus de maximale hoek die de sensor maken kan : $1.67 \cdot 10^{-2}$ rad ($\approx 0.96^\circ$). Wordt het gewenste meetbereik van het koppel gedeeld door deze hoek dan resulteert de benodigde rotatiestijfheid. Het onderscheid in meetbereik levert de stijfheden voor de sensor, in tabel 2.1 weergegeven:

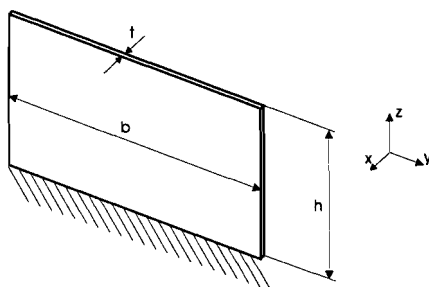
Tabel 2.1 De benodigde stijfheden als functie van het meetbereik

Type spier	Type belasting	Meetbereik	Benodigde rotatiestijfheid
Kuit	Excentrisch	40 mNm	2.5 Nm/rad
	Statisch	20 mNm	1.25 Nm/rad
Scheen	Excentrisch	8 mNm	0.5 Nm/rad
	Statisch	4 mNm	0.25 Nm/rad

2.2.1.2 De bepaling van de bladveerdimensies

De bepaling van de hoogte en de breedte van de bladveren

De kwaliteit van de koppelsensor is beter naarmate de verhouding van radiale stijfheid tot rotatiestijfheid (c_r/k) groter is. De radiale stijfheid is afhankelijk van de wijze waarop krachtdoorleiding plaatsvindt en wordt snel lager wanneer bij belasting in de bladveren buiging een grotere rol gaat spelen dan afschuiving. Hierdoor wordt de materiaalbenuttingsfactor voor krachtdoorleiding lager (Constructieprincipes). Om dit te voorkomen moet voor de bladveerdimensies een verhouding gekozen worden van $(h/b) < 0.87$ (figuur 2.4). Voor de bladveren in de koppelsensor is een verhouding van 0.8 gekozen.



Figuur 2.4 De gebruikte bladveersymbolen

De breedte 'b' van de bladveren is eveneens zo gekozen dat de verhouding (c_r/k) zo groot mogelijk is. Als indicatie van de invloed van de bladveerbreedte op deze verhouding, is gekeken naar de verhouding van de stijfheden (c_y/c_x) van één bladveer. De torsie van de bladveren is hier niet meegenomen. Door de relatie $(h/b)_{\max} = 0.8$ wordt de verhouding van de stijfheden gegeven door formule B4.7 op bijlage 4, 'Analytische bladveerberekening':

$$\left(\frac{c_y}{c_x}\right)_{h \rightarrow 0} = \frac{1.925 \cdot h^2}{6 \cdot t^2}$$

Uit deze formule blijkt dat de verhouding groter wordt wanneer h verhoogd wordt. Hetzelfde geldt voor de bladveerbreedte 'b', omdat voor de verhouding van $(h/b)_{\max} = 0.8$ gekozen is. Het verband tussen de verhouding (c_r/k) en de bladveerhoogte c.q. de bladveerbreedte is eveneens aangetoond met behulp van het eindige elementen pakket ALGOR[®] (bijlage 5, 'ALGOR[®] berekeningen', figuur B5.4).

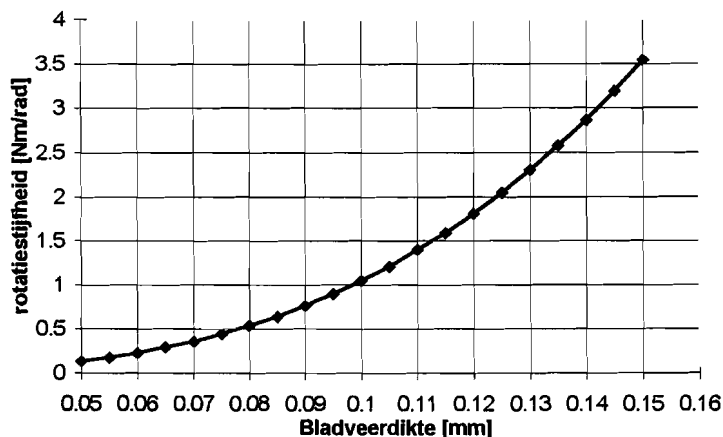
De ALGOR[®] berekeningen tonen verder aan dat de rotatiestijfheid lager wordt, wanneer bij gelijkblijvende bladveerdikte de breedte van de bladveren toeneemt (bijlage 5, figuur B5.3). Deze toename resulteert echter ook in een toename van de massatraagheid van de meetschijf. Deze massatraagheid neemt zelfs toe met de vierde macht van de straal. Om een massatraagheid van de meetschijf van $5 \cdot 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ (zie TSF koppelsensoren) te kunnen bereiken is de diameter van de meetschijf 8 mm gekozen. De maximale breedte van de bladveren ligt hiermee vast op 7 mm aangezien in het midden van de sensor een lege ruimte bestaat met een straal van 1 mm om draadvonken mogelijk te maken.

De bepaling van de bladveerdikte

Om de gewenste rotatiestijfheid uit tabel 2.1 te bereiken bestaat de mogelijkheid om de bladveren in dikte te veranderen, of om de hoogte van de bladveren aan te passen. Uit ALGOR[®] knik-berekeningen (bijlage 5) blijkt dat de verhouding tussen de knikkracht en de rotatiestijfheid van de koppelsensor (F_{knik}/k) afneemt wanneer de hoogte kleiner wordt. Het variëren van de bladveerhoogte is dus vanwege knik ongunstig om de sensor te verstijven. De verhouding neemt echter toe bij een toename van de bladveerdikte. Om deze reden is ervoor gekozen de bladveerdikte te variëren om de gewenste rotatiestijfheid te verkrijgen. In onderstaande tabel 2.2 staan de diktes met een onnauwkeurigheid van 5 μm weergegeven die de gewenste stijfheid het best benaderen. In figuur 2.5 is de stijfheid als functie van de bladveerdikte weergegeven, zoals dat door ALGOR[®] berekend is.

Tabel 2.2 De rotatiestijfheid van de sensor zoals die berekend is door ALGOR®

Bladveerdikte [mm]	Gewenste Stijfheid [Nm/rad]	Werkelijke stijfheid [Nm/rad] (ALGOR®)
0.065	0.250	0.29
0.080	0.500	0.54
0.110	1.25	1.40
0.135	2.50	2.60



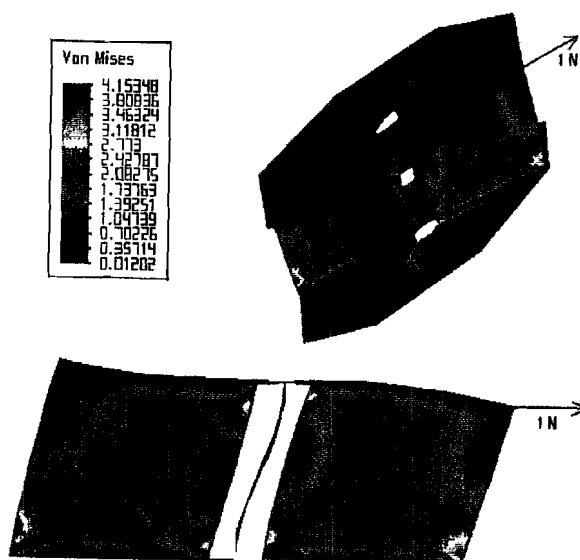
Figuur 2.5 De rotatiestijfheid als functie van de bladveerdikte

2.1.1.1 De bepaling van de meetschijfdikte

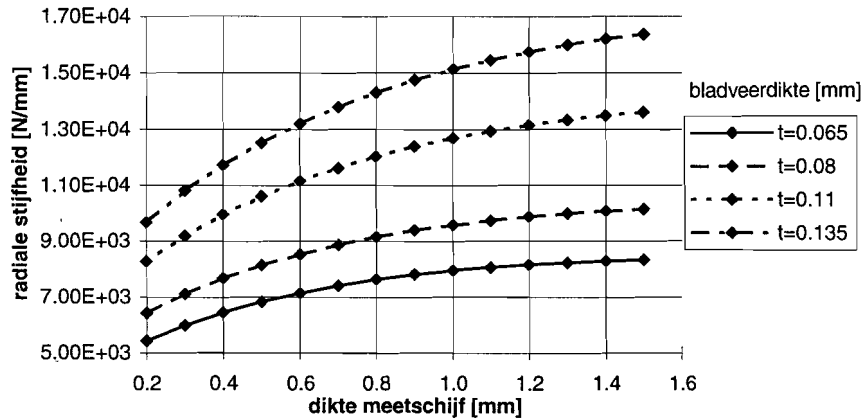
Naast de afmetingen van de bladveren in de koppelsensor speelt de dikte van de meetschijf een belangrijke rol. De dikte heeft namelijk invloed op:

- de radiale stijfheid van de sensor
- de massa draagbaarheid van de meetschijf, en hiermee de maximaal haalbare meetfrequentie

Een reden van de radiale stijfheidsreductie is de vervorming van de meetschijf als gevolg van een te kleine dikte. Er zijn met ALGOR® berekeningen uitgevoerd voor de bepaling van de radiale stijfheid van de bladveer met optimale bladveerafmetingen als functie van de meetschijfdikte. In deze berekeningen is de dikte van de meetschijf gevarieerd. De vervormingen die optreden zijn vergroot weergegeven in figuur 2.6. De resultaten van de berekeningen zijn weergegeven in figuur 2.7. In figuur 2.6 is te zien dat de spanning in de bladveren homogeen verdeeld is. Dit is het gevolg van de hoge materiaalbenuttingsfactor van de bladveren.

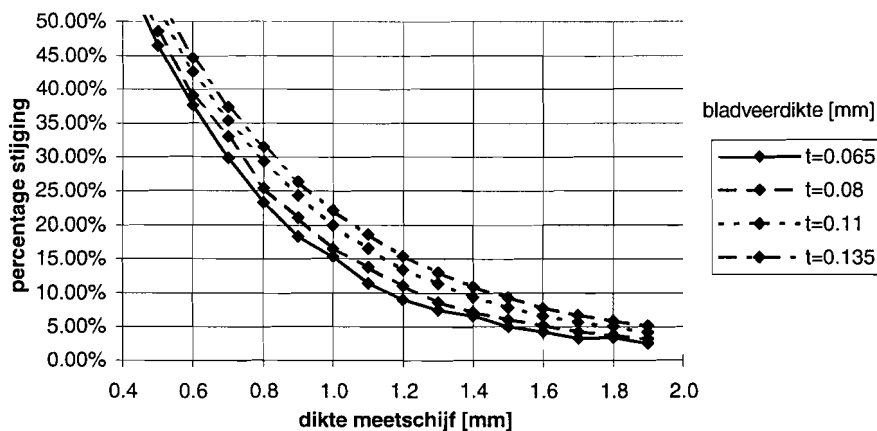


Figuur 2.6 De uitvergroete vervorming en spanningsverdeling van de elastisch gedeelte van de sensor door een radiale kracht van 1 Newton. In de legenda staan de Von Mises spanningen in N/mm^2 .



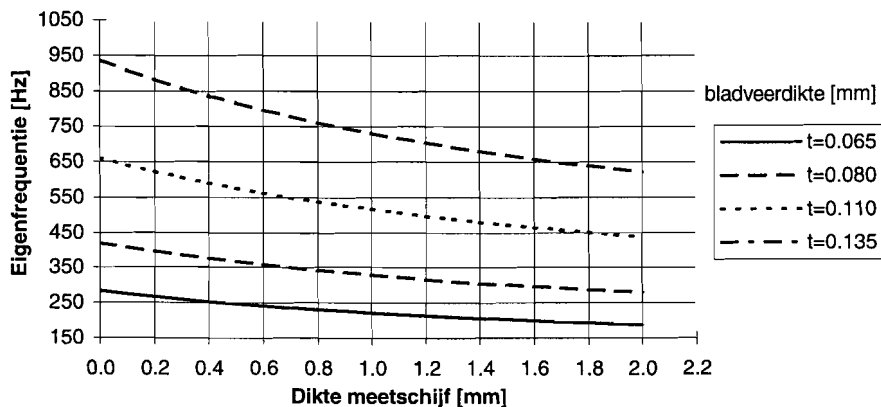
Figuur 2.7 Radiale stijfheid als functie van de dikte van de meetschijf

Uit de grafiek in figuur 2.7 blijkt duidelijk dat de radiale stijfheid toeneemt wanneer de dikte van de meetschijf toeneemt, en dat dit effect steeds minder wordt. De grafiek in figuur 2.8 toont de mate van de toename van de radiale stijfheid wanneer de dikte van de meetschijf 1 mm verhoogd wordt.



Figuur 2.8 Het percentage van de stijging van de radiale stijfheid als functie van de verdikking van de meetschijf

De massastraagheid van de meetschijf in combinatie met de rotatiestijfheid van de sensor bepaalt de eigenfrequentie van de sensor. In het spierkoppel van de muis komen maximale frequenties voor van 50 Hz. De eigenfrequentie van de sensor moet ver boven deze waarde liggen ($f_{e,min} = 200$ Hz). In onderstaande figuur 2.9 zijn voor iedere sensor de eigenfrequenties uitgezet als functie van de dikte van de meetschijf. De massastraagheid van de meetschijf is berekend op bijlage 6.



Figuur 2.9 De eigenfrequentie van de sensor als functie van de dikte van de meetschijf

Gekozen is, daar waar de massatraagheid dit toelaat, voor een dikte waarbij de stijging van de stijfheid bij verdere verdikking minder dan 10 % bedraagt. In onderstaande tabel 2.3 zijn de gekozen diktes weergegeven.

Tabel 2.3 De eigenfrequentie en radiale stijfheid van de meetschijf bij de gekozen meetschijfdiktes

Bladveer-dikte [mm]	Gekozen meetschijfdikte [mm]	Eigen-frequentie [Hz]	Radiale stijfheid [N/mm]
0.065	1.2	210	$8.2 \cdot 10^3$
0.085	1.3	310	$1.0 \cdot 10^4$
0.115	1.4	480	$1.4 \cdot 10^4$
0.145	1.5	670	$1.6 \cdot 10^4$

2.2.2 De Servomotor

Evenals bij de TSF-koppelsensor, besproken in paragraaf 2.1, is voor de aandrijving van de koppelsensor van het eigen ontwerp gekozen voor een servosysteem. De grootte van de servomotor is afhankelijk van het lastkoppel. Dit lastkoppel wordt bepaald door de massatraagheid van het roterende gedeelte, het muizekoppel en de stijfheid van de bedrading.

De massatraagheid van de sensor is $\pm 5 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. Deze waarde vermenigvuldigd met de maximale rotatieversnelling van 2240 rad/sec^2 , levert een aandrijfkoppel op van 11.2 mNm. Het maximaal te meten muizekoppel is afhankelijk van de te meten spier en van het belastingstype. Deze kan maximaal een waarde hebben van 40 mNm. Het totale lastkoppel bedraagt in dat geval 51.2 mNm. Om de massatraagheid van de motor te versnellen en de stijfheid van de bedrading te overwinnen (zie paragraaf 2.1.1) wordt een motor gekozen voor een lastkoppel van 75 mNm.

2.3 Nauwkeurigheid van de koppelmetering en de beweging van de verschillende koppelsensoren

In deze paragraaf zullen de nauwkeurigheid van de beweging en de nauwkeurigheid van de koppelmetering worden bepaald. De onnauwkeurigheden zijn niet geheel onafhankelijk van elkaar omdat een onnauwkeurigheid in de beweging de meetnauwkeurigheid van het koppel beïnvloedt. Eerst zal dus de nauwkeurigheid van de beweging beschouwd worden om te bepalen of de bereikte hoekonnauwkeurigheid kleiner is dan de eis van 1° . Vervolgens zal de invloed van deze hoekafwijking op de koppelmetering worden bekeken. Omdat er ook afwijkingen in de koppelmetering zelf optreden, wordt tenslotte deze meetnauwkeurigheid bepaald.

De nauwkeurigheid waarmee de gewenste hoek gehaald wordt is afhankelijk van het feit of er sprake is van een statische meting, waarbij de hoek in de tijd niet varieert, of van een dynamische meting waarbij dit wel het geval is. In de koppelmetering is ook een dergelijk onderscheid te maken. De koppelmetering is afhankelijk van het feit of er sprake is van een statisch koppel, een koppel dat in de tijd constant blijft, of van een dynamisch koppel. In de praktijk is er per definitie sprake van een dynamisch koppel, welke frequenties bevat tussen 0 en 50 Hz. De zeer laagfrequente koppels treden op wanneer het spierkoppel van de muis het maximale niveau heeft bereikt. De hoogfrequente spierkoppels treden op bij de start van de contractie, wanneer het spierkoppel opgebouwd wordt. Bij de interpretatie van de meetnauwkeurigheden is het van belang te realiseren dat er altijd sprake is van tussenliggende situaties.

2.3.1 De hoeknauwkeurigheid bij een statische meting

De gewenste constante voethoek moet verwezenlijkt worden met behulp van het servosysteem en de koppelsensor. Deze zijn beiden oorzaken van onnauwkeurigheid.

De hoeknauwkeurigheid van het servosysteem wordt bepaald door de regellus. Deze nauwkeurigheid wordt hoger naarmate de servostijfheid, en dus de versterking in de regellus, groter wordt. Met een voldoende snelle regeling is een nauwkeurigheid haalbaar van 1 à 2 encoderstappen. In het servosysteem is gekozen voor een Hewlett-Packard encoder met maximaal 8192 counts per omwenteling. Voor de hoek betekent dit een onnauwkeurigheid van $0.04^\circ \sim 0.08^\circ$. Dit is verwaarloosbaar klein vergeleken met de eis (1°).

De sensor zelf veroorzaakt, afhankelijk van het te meten koppel, de grootste fout in de hoek. Bij de TSF-sensor bedraagt deze volgens opgave $\pm 1^\circ$ en van de sensor van het eigen ontwerp bedraagt de fout maximaal $0.96^\circ \approx 1^\circ$.

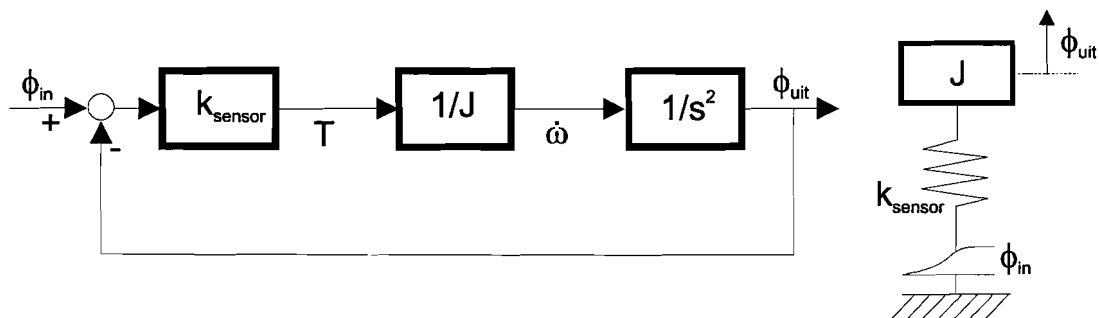
De invloed van de hoekafwijking op de statische koppelmetering

Een afwijking in de koppelmetering kan ontstaan, wanneer het servosysteem een hoekfout veroorzaakt met een frequentie hoger dan de eigenfrequentie van de sensor. In verband met de servo-update frequentie van de regelkaart die vele malen hoger ligt dan de eigenfrequentie van de koppelsensor is deze mogelijkheid zeer reëel. Wanneer dit het geval is wordt de hoekfout niet door de sensor doorgegeven waardoor er een hoekverschil ontstaat tussen de motoras en de meetas. Het hoekverschil wordt door de sensor waargenomen als een koppel. Dit verschijnsel wordt in hoofdstuk 3 behandeld als 'Digital Jitter'.

De grootte van deze afwijking is bij een hoekfout van 1 à 2 encoderstappen $\pm 5\%$. Deze afwijking is een toevallige afwijking en vertoont een statistisch gedrag. De nauwkeurigheid kan door middeling verbeterd worden.

2.3.2 De hoeknauwkeurigheid bij een dynamische meting

De hoekafwijkingen die ontstaan bij de sinusvormige beweging van de voet van de muis, worden in belangrijke mate bepaald door de geringe rotatiestijfheid van de koppelsensor. Wanneer aangenomen wordt dat de afwijkingen afkomstig van het servosysteem verwaarloosbaar klein zijn ten opzichte van de afwijkingen veroorzaakt door de lage rotatiestijfheid van de koppelsensor, kan een model opgesteld worden zoals weergegeven in figuur 2.10. In het blokschema staan de overdrachtsfuncties weergegeven in de blokken tussen twee grootheden behorend bij de pijlen van en naar die blokken. Hierbij is gebruik gemaakt van de Laplace transformatie.



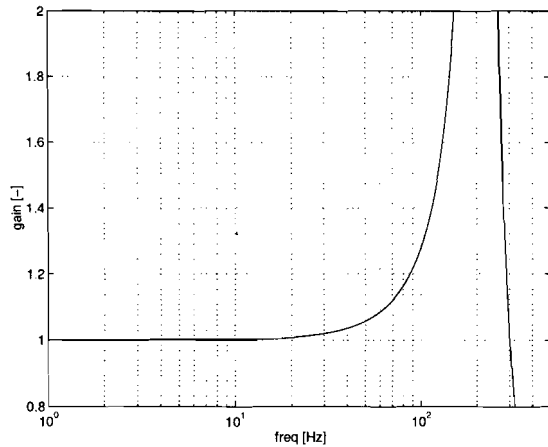
Figuur 2.10 Het blokschema en het dynamisch model van de aandrijving door de koppelsensor

Voor de overdrachtsfunctie tussen ϕ_{in} en ϕ_{uit} geldt:

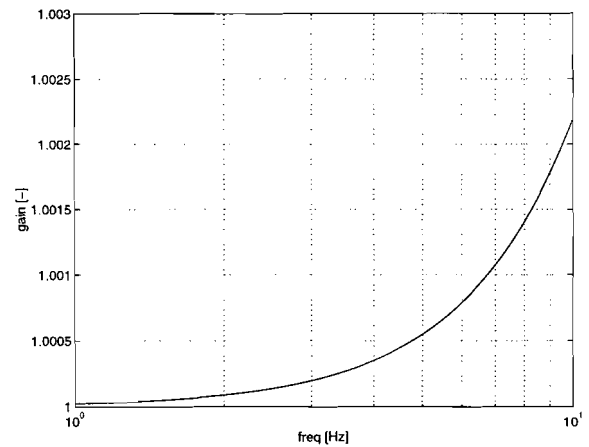
$$H_{tot} = \frac{k/J}{s^2 + k/J}$$

De afwijkingen kunnen in kaart gebracht worden met behulp van een bodediagram. Uit het fase-deel van het bodediagram blijkt dat er geen fase-achterstand bestaat tot de eigenfrequentie bereikt is. Uit het amplitudedeel van het bodediagram ('versterkingsdiagram') zijn op die manier de grootste afwijkingen te bepalen. Het versterkingsdiagram is weergegeven voor de minst stijve, en dus meest kritische, sensor van het eigen sensorontwerp (zie figuur 2.11). In de grafiek is aan de hand van de piek duidelijk de laagste eigenfrequentie van 210 Hz (vergelijk tabel 2.3) te zien. Aangezien deze eigenfrequentie veel hoger ligt dan de bewegingsfrequentie levert deze geen gevaar van resonantie op.

Om de hoekafwijking van de koppelsensor bij een frequentie van 8.5 Hz te bekijken is in figuur 2.12 een deel van het versterkingsdiagram vergroot afgebeeld. Wanneer de sensor aangedreven wordt volgens een sinus met een amplitude van 45° en een frequentie van 8.5 Hz, is de versterking gelijk aan ± 1.0016 . De uitgaande hoek is dan gelijk aan $1.0016 * 45^\circ = 45.072^\circ$. De maximale hoekafwijking is 0.072° .



Figuur 2.11 De versterking van de bewegingsamplitude die optreedt tussen de opgelegde hoek en de hoek van de muizevoet



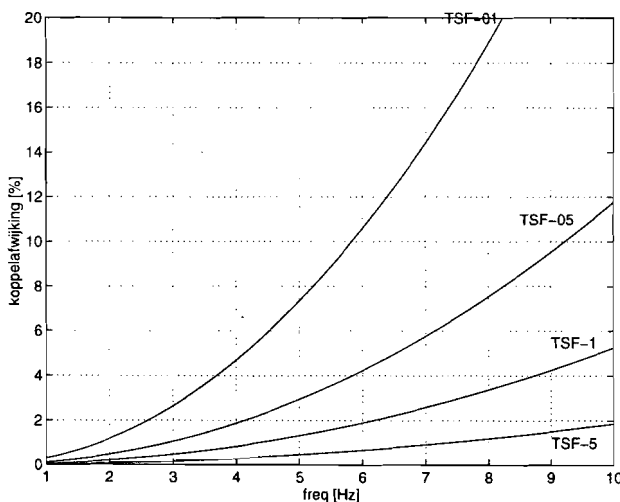
Figuur 2.12 Een vergroting van figuur 2.11

De invloed op van de hoekafwijking op de dynamische koppelmetering

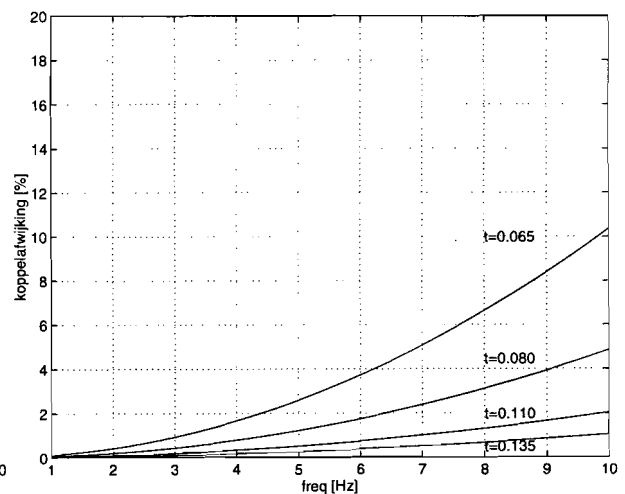
De hoekafwijking die bij een dynamische meting ontstaat betekent concreet een hoekverschil over de koppelsensor en veroorzaakt dus een meeton nauwkeurigheid van het spierkoppel. De grootte van de fout is voor de slapste koppelsensor van het eigen ontwerp gelijk aan:

$$\frac{\Delta\varphi}{\varphi_{\text{tot}}} = \frac{0.072^\circ}{0.955^\circ} \cdot 100 \% = 7.5 \%$$

In de onderstaande figuur 2.13 en figuur 2.14 zijn als functie van de bewegingsfrequentie voor alle behandelde koppelsensoren de meetafwijkingen van het spierkoppel uitgezet.



Figuur 2.13 De TSF-koppelsensoren
De meetafwijking van het spierkoppel als functie van de bewegingsfrequentie



Figuur 2.14 De koppelsensoren van het eigen ontwerp
De meetafwijking van het spierkoppel als functie van de bewegingsfrequentie

2.3.3 De nauwkeurigheid van de koppelmetering bij een statisch koppel

De meeton nauwkeurigheid van de TSF-sensor bij een statisch koppel, is door de fabrikant opgegeven en bedraagt ongeveer 1~2%. De specificaties zijn weergegeven in bijlage 2. De nauwkeurigheid wordt in belangrijke mate bepaald door de niet-lineariteit van de sensor. Deze nauwkeurigheid is dus door kalibratie van de sensor te verbeteren.

De meeton nauwkeurigheid van de koppelsensor van het eigen ontwerp bij een statisch koppel, is afhankelijk van de meeton nauwkeurigheid van de inductieve sensoren. De specificaties van de fabrikant zijn eveneens weergegeven in

bijlage 2. Ook hier wordt de nauwkeurigheid voor een belangrijk deel bepaald door de niet-lineariteit van 1 %. Kalibratie zal deze afwijking als het gevolg van de niet-lineariteit verminderen.

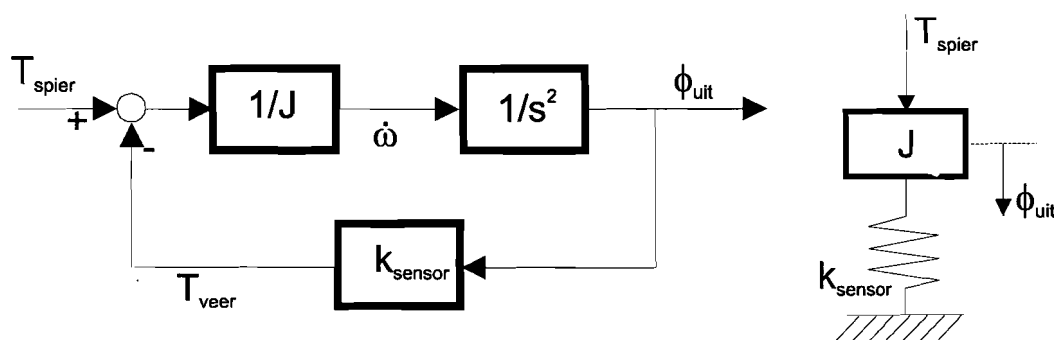
Na kalibratie is met beide sensoren een meetnauwkeurigheid haalbaar van beter dan 1%. Bij de koppelsensor van het eigen ontwerp kan een hogere meetnauwkeurigheid verwacht worden dan bij de TSF koppelsensoren omdat deze de volgende kenmerken heeft:

- Er wordt gemeten met twee sensoren in plaats van één.
- De koppelsensor is volledig elastisch en dus vrij van hystereses.
- Vanwege de statische pool bij rotatie en de afwezigheid van interne spanningen is een zeer grote lineariteit te verwachten, als gevolg van de constante rotatiestijfheid k .

2.3.4 De nauwkeurigheid van de koppelmeting bij een dynamisch koppel

Het spierkoppel geleverd door de muis is dynamisch van aard. De hoogst voorkomende frequentie van dit koppel wordt bepaald door de stijgtijd van het spierkoppel bij de start van een spiercontractie. Onder stijgtijd wordt verstaan de tijd die verstrijkt tussen geen koppel en 90% van het maximale spierkoppel bij stimulatie van de spier. Deze stijgtijd bedraagt minimaal ca. 10 ms (De Haan et al, 1995). Het is gewenst dat frequenties in het spierkoppel van 50 Hz nog met voldoende nauwkeurigheid gemeten kunnen worden.

Om de invloed van het dynamische koppel van de muis op de nauwkeurigheid van de koppelmeting te analyseren is de overdrachtsfunctie bepaald tussen spierkoppel en hoekverschil over de koppelsensor. Dit is gedaan aan de hand van het blokschema en het dynamisch model in figuur 2.15. Ook hier staan in het blokschema de overdrachtsfuncties in de blokken weergegeven tussen twee grootheden behorend bij de pijlen van en naar die blokken. Hierbij is gebruik gemaakt van de Laplace transformatie.

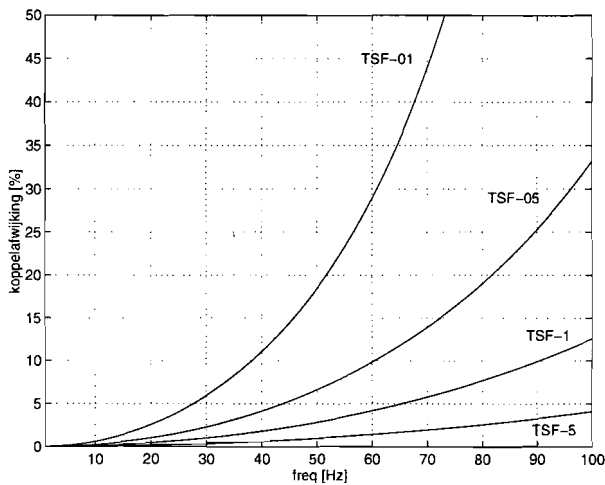


Figuur 2.15 Het blokschema en het dynamisch model van de koppelsensoren ter bepaling van de meetnauwkeurigheid van een dynamische koppel

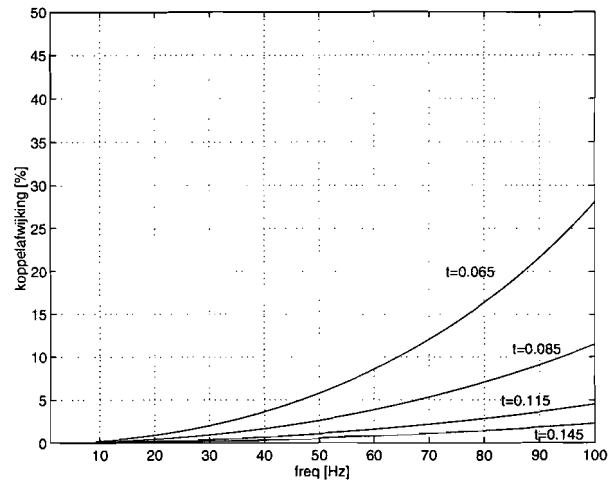
De overdrachtsfunctie van dit blokschema luidt:

$$H_{\text{tot}} = \frac{1}{Js^2 + k}$$

Aan de hand van het bodediagram van deze overdrachtsfunctie is de onnauwkeurigheid van het koppel bepaald voor verschillende frequenties van het spierkoppel. In figuren 2.16 en 2.17 is de onnauwkeurigheid van alle koppelsensoren weergegeven als functie van de frequentie van het spierkoppel.



Figuur 2.16 De TSF-koppelsensoren
De meetafwijking van het spierkoppel als functie van de frequentie in het spierkoppel



Figuur 2.17 De koppelsensoren van het eigen ontwerp

2.4 Conclusie

Aan de hand van het voorafgaande kan het volgende geconcludeerd worden:

- Wanneer de grafieken van de nauwkeurigheden in figuur 2.13 en 2.16 worden vergeleken met de die in figuur 2.14 en 2.17 kan worden geconcludeerd dat over het hele frequentiebereik met behulp van de koppelsensor van het eigen ontwerp een hogere meetnauwkeurigheid kan worden gehaald dan met de TSF-koppelsensoren. Dit verschil wordt met name veroorzaakt door de hogere rotatiestijfheid en de lagere massa-traagheid van de koppelsensor van het eigen ontwerp.
- Aangezien in de koppelsensor van het eigen ontwerp twee inductieve sensoren worden toegepast kan met dit ontwerp een hogere nauwkeurigheid in de koppelmeting worden gehaald. Ook kan door toepassing van twee inductieve sensoren een eventuele translatie worden onderscheiden van een rotatie.
- Naast de inductieve sensoren kunnen de torsieveren in de sensoren een oorzaak zijn van niet-lineariteiten. Met betrekking tot de torsieveer in de koppelsensor van het eigen ontwerp kan in ieder geval geconcludeerd worden dat:
 - de torsieveer uit één stuk vervaardigd is en hierdoor vrij is van interne spanningen;
 - de torsieveer volledig elastisch is en dus hysteresis vrij;
 - de rotatiepool bij rotatie van de meetschijf niet verplaatst;
- De TSF-koppelsensor is kant en klaar verkrijgbaar.

Algemeen kan geconcludeerd worden dat het eigen ontwerp beter voldoet dan het ontwerp van de TSF-koppelsensor. Het eigen ontwerp verdient dan ook duidelijk de voorkeur voor realisatie.

3. Mechatronisch koppel meten

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden twee ontwerpen van servosystemen behandeld waarmee een koppel gemeten kan worden door naar de inspanning te kijken die de besturing van een servosysteem levert. Voordat de afzonderlijke componenten worden besproken zal eerst een korte beschouwing van het totale systeem gegeven worden.

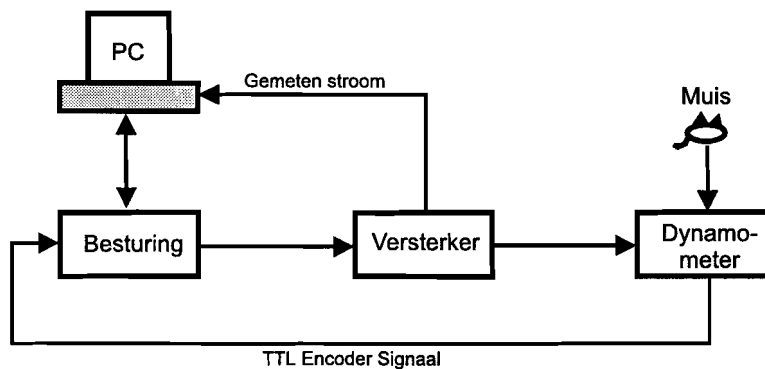
3.1.1 Het werkingsprincipe

Wanneer de as van een servomotor wordt belast door een koppel moet de servomotor een tegenkoppel leveren om de as niet van stand te laten veranderen. De grootte van dit servokoppel wordt bepaald door de besturing van het servosysteem en is bij stilstand gelijk aan het lastkoppel. Het servokoppel ontstaat doordat er een spanning over de spoel van de gelijkstroommotor wordt gezet en er stroom door de spoel in het magnetisch veld gaat lopen. Het servokoppel is met de motorconstante lineair afhankelijk van de stroom door de spoel. Het lastkoppel kan dus gemeten worden door deze stroom te meten.

Wanneer de voet moet bewegen is er echter nog een extra koppel nodig. Er is een koppel nodig om de massa traagheid te versnellen en om het wrijvingskoppel te overwinnen. De afwijkingen die hieruit voortkomen moeten zo klein mogelijk zijn. De massa traagheid en de wrijving dienen dus geminimaliseerd te worden.

3.1.2 De opbouw van het totale servosysteem

Het totale servosysteem is weergegeven in figuur 3.1.



Figuur 3.1 De opbouw van het totale servosysteem

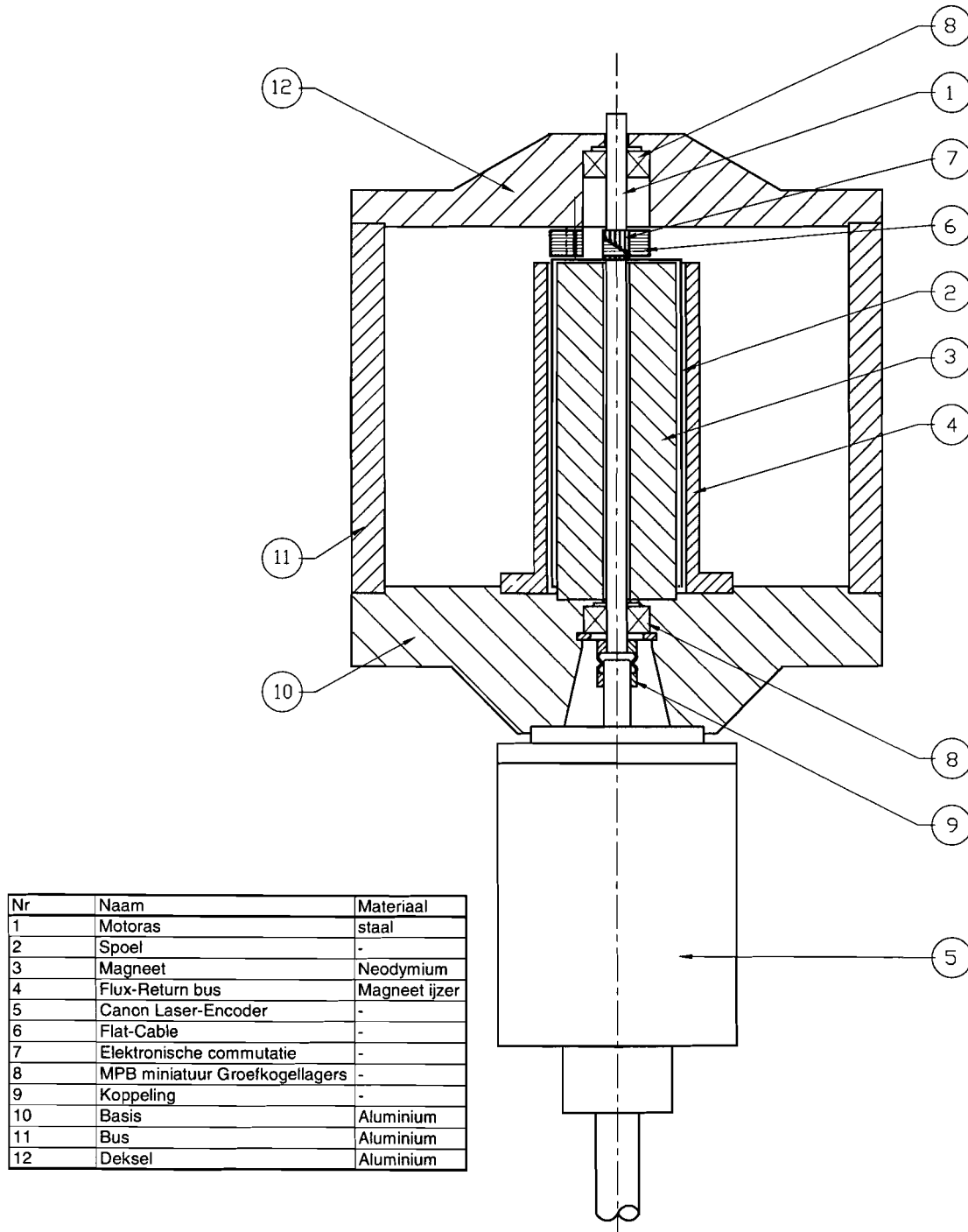
De communicatie met het totale systeem geschiedt via een PC. Met deze PC is het mogelijk om de muizevoet een gewenste beweging te laten maken. Daarvoor moet de besturing van de PC het gewenste hoek- en snelheidsprofiel binnenkrijgen. Na decodering van het positie signaal afkomstig van het meetinstrument in de vorm van een TTL-encodersignaal worden de twee ingangssignalen via een reken algoritme in de besturing verwerkt tot een uitgangssignaal. Dit uitgangssignaal is een spanning en een maat voor het benodigde motorkoppel in het meetinstrument, die daarmee de gewenste beweging zo goed mogelijk kan realiseren. Met deze besturingsspanning wordt een versterker aangestuurd, die de commutatie van de spoelen in de constructie verzorgt. De stroom waarmee binnen een bepaalde fase koppel gerealiseerd wordt, wordt gemeten en door de PC ingelezen.

3.2 De ontwerpen van het meetinstrument

In dit hoofdstuk worden twee alternatieve ontwerpen van het meetinstrument voor het servosysteem behandeld. De positie van het meetinstrument in het totale systeem is weergegeven in figuur 3.1.

3.2.1 De constructie voor het hoge resolutie servosysteem

Van het eerste ontwerp is in figuur 3.2 een langsdoorsnede weergegeven.



Figuur 3.2 Het meetinstrument van het hoge resolutie servosysteem, schaal 1:1

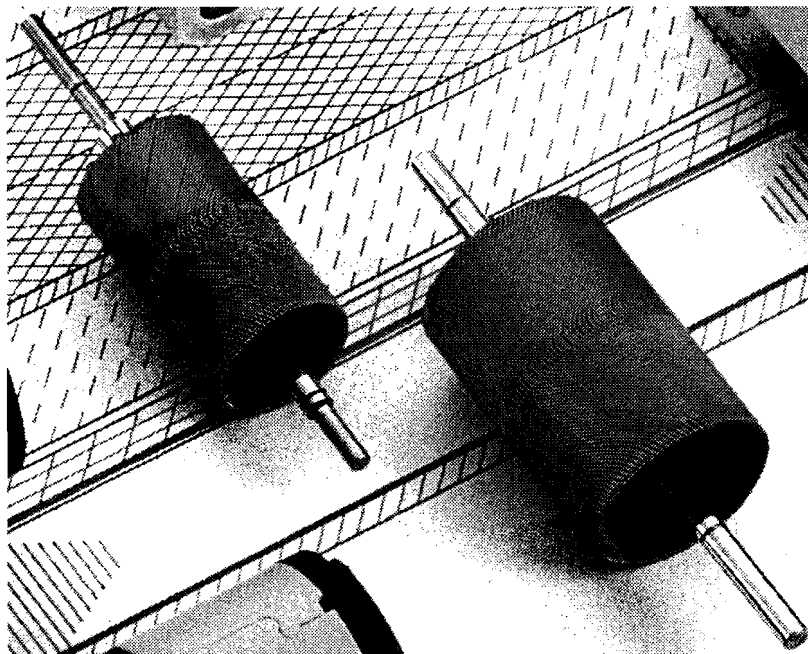
3.2.1.1 Beschrijving

Een as (1) zorgt voor de aandrijving van de voet van de muis. Aan deze as is de spoel (2) van een elektromotor bevestigd. Deze spoel kan roteren in een luchtspleet waarin een radiaal gericht magnetisch veld aanwezig is, afkomstig van de Neodymium magneet (3) van de elektromotor. Een bus (4) van magneetijzer rondom de spoel zorgt voor de flux-return. Aan het uiteinde van de as zit met een radiaal slappe en tangentiaal stijve koppeling (9) de uitgaande as van een laser-encoder (5) van de firma Canon verbonden, die de hoek-informatie voor de regeling verzorgt. Omdat de spoel nooit 360° hoeft rond te draaien, kan de voeding van de spoel plaatsvinden met behulp van een flat-cable (6), die gelaserlast is aan de lamellen van de commutatie (7). Hierdoor is een wrijvingsloze voeding van de spoel verkregen. De motoras (1) is gelagerd ten opzichte van het huis. Het huis bestaat uit een basis (10), een afstandsbus (11), en een deksel (12). De groefkogellagers (8) zijn van de firma MPB Europa.

3.2.1.2 De elektromotor

De rotor (2) van de elektromotor is ijzerloos en bestaat alleen uit wikkelingen koperdraad die door kunststof bijeen gehouden worden. In figuur 3.3 zijn twee van deze rotoren op een foto afgebeeld. Op deze wijze is een zeer lage massatraagheid van de spoel verwezenlijkt. Deze rotor is afkomstig uit een gelijkstroommotor van de firma MAXON. Van verschillende motoren met een dergelijke rotor is het motorkoppel van elke fase als functie van de spoelhoek getest. De resultaten hiervan zijn terug te vinden in bijlage 7 ('De motorexperimenten'). De wikkeling van de MAXON rotor is zodanig dat geen axiale krachten geïntroduceerd worden. Verder hebben motoren van MAXON in het algemeen meer commutatie segmenten dan Escap motoren en sluiten beter aan op het gewenste bereik.

Omdat het gemeten koppel gerelateerd wordt aan de gemeten stroom door de spoel, dient de motorconstante van de motor zo constant mogelijk te zijn bij rotatie van de rotor, dan wel een zeer voorspelbaar verloop te hebben als functie van de rotorstand. Dit betekent dat het magnetisch veld zo homogeen mogelijk rondom de magneet verdeeld moet zijn. Omdat eventuele bewerkingen aan de magneet deze homogeniteit kunnen verstoren, is de magneet aan de basis (10) gelijmd.



Figuur 3.3 De Maxon rotor

3.2.1.3 De encoder

In dit ontwerp is er sprake van een directe hoekmeting, dat wil zeggen een hoekmeting waar geen sprake is van een overbrenging. De positie wordt gemeten met behulp van een contactloze laser-encoder. Door deze twee eigenschappen wordt hysteresis vermeden, wat de nauwkeurigheid van het servosysteem bevordert.

De Canon laser-encoder is een encoder met een zeer hoge resolutie. Voor dit ontwerp zijn twee types met dezelfde afmetingen te gebruiken. Beide types geven 81.000 pulsen per omwenteling, maar bij type R-10 bestaat dit signaal uit blokvolgen en bij type K1 bestaat dit signaal uit sinusvormige golven. Bij blokvolgen kan men door 'edge detection' de resolutie een factor vier verbeteren en bij sinusvormige golven een factor 16 (of hoger, afhankelijk van de besturing).

Deze hoge resolutie is zeer waardevol omdat de encoder de regeling van informatie moet voorzien. Omdat het gemeten koppel voortkomt uit de regeling, is er voor de regeling wat betreft de resolutie geen beperking om een hoge nauwkeurigheid te bereiken. Na uitgebreid marktonderzoek bleken beide encoders een zeer lage massa-traagheid ($\pm 8 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$) te hebben vergeleken met andere encoders met een hoge resolutie.

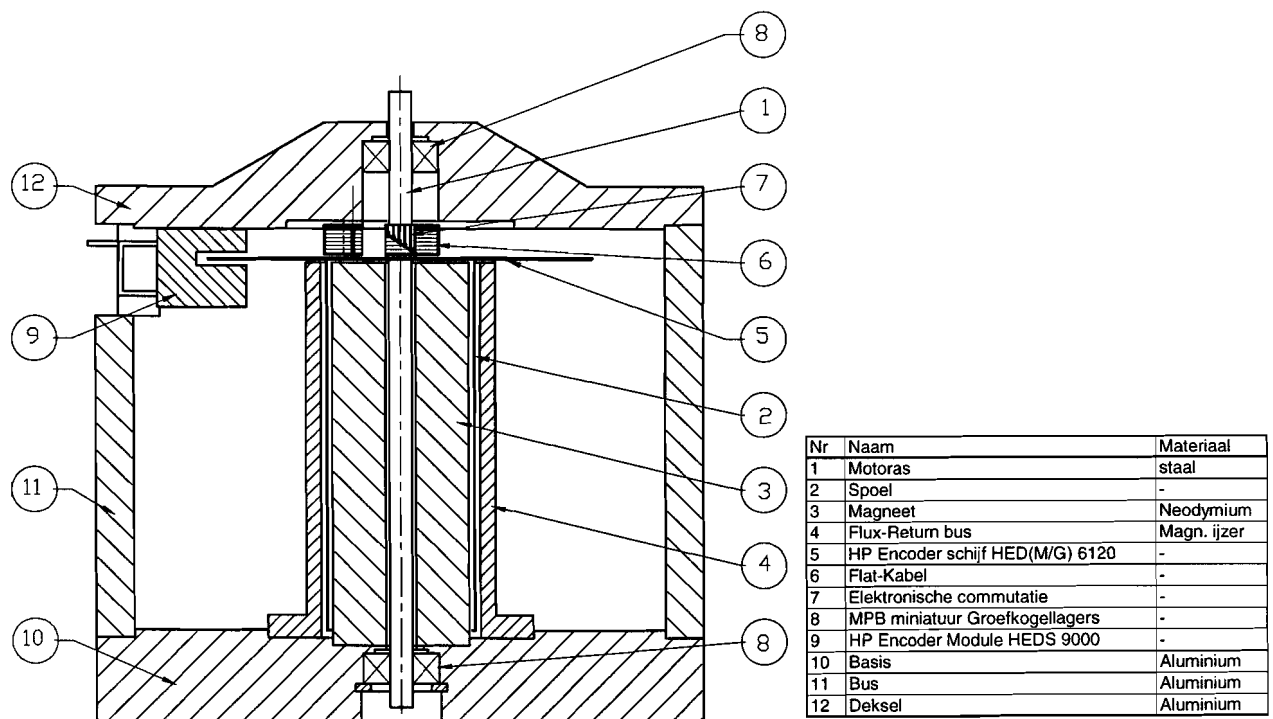
Deze encoders hebben een maximale omwentelingsfrequentie van 6 Hz. Tot deze frequentie is de werking van de encoder door de fabrikant gegarandeerd. Praktisch gezien betekent dit dat bij sinusvormige bewegingen van de voet met hogere frequenties dan 6 Hz, de amplitude kleiner moet zijn dan 45° .

3.2.1.4 De lagering

De groefkogellagers veroorzaken een wrijvingskoppel. De fabrikant geeft waarden voor het startkoppel voor verschillende maten van de lagers. De lagers uit het ontwerp hebben een wrijvingskoppel van ongeveer $1.5 \cdot 10^{-2} \text{ mNm}$ per lager bij een radiaal gerichte kracht van 0.75 N, en een koppel van ongeveer $5.0 \cdot 10^{-2} \text{ mNm}$ bij een kracht van 4 N (MPB-catalogus p.72).

3.2.2 De constructie voor het lage resolutie servosysteem

Het tweede ontwerp is afgebeeld in figuur 3.4.



Figuur 3.4 Het meetinstrument voor het lage resolutie servosysteem

3.2.2.1 Beschrijving

Voor de aandrijving van de uitgaande as (1), waaraan de voet van de muis wordt bevestigd, is hetzelfde type motor (2,3,4) gebruikt als bij de constructie van het hoge resolutie systeem. Ook de commutatie (6,7) komt op dezelfde manier tot stand. Ook hier is de motoras (1) met behulp van groefkogellagers (8) gelagerd ten opzichte van het huis (10,11,12). De hoekinformatie voor de regeling is in dit ontwerp afkomstig van een encoder van Hewlett-Packard (5 en 9).

3.2.2.2 De encoder

De Hewlett-Packard encoder heeft een zeer lage massa-traagheid ($< 1 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$) en is op de spoel van de motor gelijmd waardoor de encoder met zeer hoge stijfheid wordt aangedreven. Ook heeft de encoder geen eigen lagering met wrijving en is de koppeling tussen motor- en encoder-as niet meer nodig.

De encoder module (9) is gemonteerd tegen het deksel (12). Het uitlijnen geschiedt met behulp van twee uitlijnpennen van 2.41/2.44 mm diameter en 0.76 mm hoog. Deze pennen zijn in de deksel aangebracht op een bepaalde straal van de motoras en binnen een zogenaamde 'tolerantie cirkel' met een straal van 0.13 mm (HP-catalogus pl. 17).

Deze encoder heeft een lagere resolutie (incl. 'Edge Detection' 8192 pulsen per omwenteling) dan de encoder van het hoge resolutie ontwerp. Dit heeft bij lage bewegingssnelheden voor de regeling het gevolg dat deze invloed ondervindt van de discrete stapjes. Dit wordt in paragraaf 3.4.5 behandeld. Echter door de kleinere informatiestroom van de encoder naar de regeling, zijn veel grotere bewegingssnelheden haalbaar ($>> 6 \text{ Hz}$) dan met de Canon laser-encoder.

3.3 De keuze van de versterker en de besturing

Zoals weergegeven is in figuur 3.1 moet het mechanische meetinstrument gevoed worden door een versterker. De versterker wordt aangestuurd door een besturingskaart die de regellus in het servosysteem sluit.

Om een zo klein mogelijk fasedraaiing in het systeem te realiseren is een besturing nodig met een zo hoog mogelijke sample-frequentie en servo-update tijd. Gevonden is de besturingskaart PMAC, die geleverd wordt door de firma VECTOR-Aandrijftechniek. Deze besturingskaart haalt volgens de leverancier een samplefrequentie van meer dan 1 kHz. De servo-update tijd is gelijk aan 40-60 μsec . Tevens kan deze kaart acht assen tegelijk aansturen, wat wellicht de mogelijkheid biedt om met de besturing de verschillende fasen van de motor aan te sturen.

Wanneer dit laatste het geval is dan heeft iedere fase van de motor een aparte versterker nodig. Wanneer dit echter niet het geval is dan dient één versterker met een aantal extra componenten als functie van de besturingsspanning en de positie-informatie van het meetinstrument de verschillende fasen van de motor aan te sturen. Om de variatie in de motorconstante zo klein mogelijk te maken, moet de versterker zo veel mogelijk fasen kunnen aansturen. Het aantal fasen is maximaal gelijk aan het aantal lamellen van de commutatie van de spoel. De commutatie dient in één fase sinusvormig te verlopen, omdat dan theoretisch een constante motorconstante verkregen kan worden (Lammers, 1994).

3.4 Modellering

In deze paragraaf is een modellering gemaakt van beide ontwerpen. Om de werking van het servosysteem te kunnen analyseren is een PID-regelaar in het model verwerkt. De modellering bestaat uit een blokschema. Aan de hand van dit blokschema kunnen de overdrachtsfuncties opgesteld worden tussen twee grootheden uit de modellering. Deze manier van modelleren geeft een duidelijk inzicht in de samenhang tussen de verschillende onderdelen in de constructie.

Met de modellering kunnen onder andere de volgende aspecten van de ontwerpen worden bekeken:

- Met de modellering kan een schatting worden gemaakt in hoeverre het servosysteem de gewenste hoeken kan realiseren en wat de haalbare nauwkeurigheid van koppelmetering is.
- Met het model kan de invloed van de encoder-resolutie op de nauwkeurigheid van de koppelmetering bestudeerd worden.
- Met de modellering kan bekeken worden in hoeverre het mogelijk is te corrigeren voor het koppel om de massa draagheid te versnellen. Dit koppel kan worden beschouwd als een systematische afwijking op het gemeten koppel, waarvoor in het servosysteem gecorrigeerd kan worden. Deze correctie vindt plaats aan de hand van de berekende versnelling uit de gewenste hoek. Het model geeft informatie over het verband tussen deze berekende versnelling en de werkelijke versnelling.

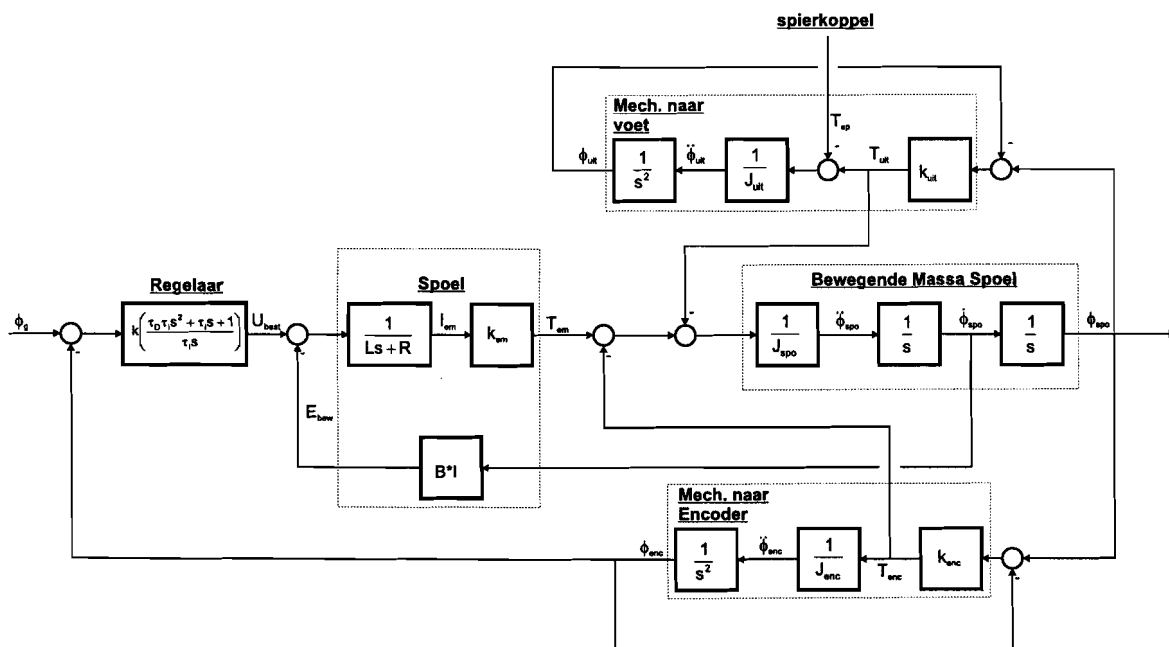
Aan de hand van deze analyses is in kaart gebracht waar de verschillen in de ontwerpen zich bevinden, en welke ontwerpen het meest geschikt zijn voor toepassing.

Er moet bij de bespreking van onderstaande modelleringen met behulp van blokschema's rekening gehouden worden met het feit dat het een geïdealiseerde afspiegeling is van de werkelijkheid. Dit wil zeggen dat de blokken in de blokschema's zijn voorgesteld als frequentie-onafhankelijke lineaire proportionele systemen. In werkelijkheid zullen deze door tijdsvertragingen in meer of mindere mate fase draaiingen veroorzaken. Een belangrijke tijdsvertraging is aanwezig in de digitale regelaar. Deze tijdsvertraging wordt bepaald door de sample-tijd. Bij een sample-tijd van 1 ms zal bij een bewegingsfrequentie van 8.5 Hz de hoek van de motoras een fase draaiing vertonen van 1.5°. Met behulp van een uitgebreidere regeling dan een PID-regelaar in de vorm van hogere orde filters kan deze fase draaiing echter gecompenseerd worden (Lammers, 1994).

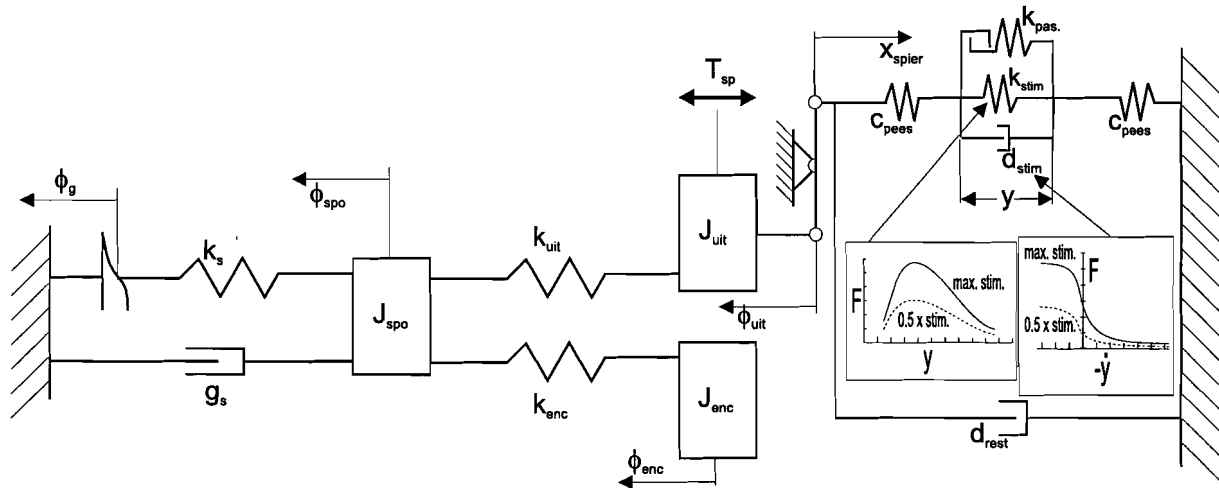
Ondanks deze afwijking van de werkelijkheid is de modellering geschikt om inzicht te krijgen in welke paramaters veel invloed hebben op de nauwkeurigheid van het totale systeem. Het vergelijk tussen de verschillende ontwerpen uit dit hoofdstuk wordt gemaakt op grond van identieke berekeningen waardoor duidelijk wordt welk ontwerp het meest geschikt is.

3.4.1 De modellering van het hoge resolutie servosysteem

In figuur 3.5 is het blokschema weergegeven van het hoge resolutie servosysteem. In figuur 3.6 is het dynamisch model weergegeven wat daarbij hoort.



Figuur 3.5 Blokschema hoge resolutie systeem



Figuur 3.6 Dynamisch model hoge resolutie systeem

Beschrijving

In het blokschema wordt de gewenste hoek (ϕ_g) vergeleken met de encoderhoek (ϕ_{enc}). Het verschil wordt door de regelaar en versterker omgezet in een spanning (U_{best}). Deze spanning staat over de spoel van de gelijkstroommotor waardoor er stroom (I_{em}) gaat lopen door het magnetisch veld. Hierdoor ontstaat er een lorentzkracht in de luchtspleet, zodat een koppel (T_{em}) de massa van de spoel in beweging kan zetten. Deze beweging betekent een verandering in spoelhoek (ϕ_{spo}) die waargenomen wordt door de encoder (ϕ_{enc}). De hoek van de spoel verandert ook via de uitgaande as met een rotatiestijfheid (k_{uit}) en massa's (J_{uit}) de stand van de voet van de muis. De rotatiestijfheid van de uitgaande as, dat de hoek naar de muizevoet doorgeeft (k_{uit}), en het gedeelte van de motor-as dat voor de hoekverdraaiing van de encoder zorgt (k_{enc}), zorgen ervoor dat bij een hoekverschil ($\phi_{spo} - \phi_{enc}$ of $\phi_{spo} - \phi_{uit}$) koppels ontstaan (T_{uit} en T_{enc}). Deze koppels vinden hun reactiekoppel in het electromagnetisch koppel (T_{em}). Het spierkoppel komt via de stijfheid k_{uit} en de massa's (J_{uit}) het meetinstrument binnen en vindt zijn reactiekoppel in het koppel T_{em} . Verder ontstaat er bij beweging van de rotor een tegen-EMK (E_{bew}) die van de spanning U_{best} moet worden afgetrokken.

In het dynamisch model is verondersteld dat de gemodelleerde stijfheden en dempingsfactoren van de muis verwaarloosbaar klein zijn ten opzichte van die van de constructie. Aangenomen is daarom dat deze in het dynamisch model geen rol van betekenis zullen spelen. De voor de spier gebruikte symbolen hebben de volgende verklaring:

- c_{pees} : De stijfheid van het bindweefsel van de spier, zoals bijvoorbeeld de pezen.
- k_{pas} : De passieve stijfheid van de spier.
- k_{stim} : De stijfheid van de spier als gevolg van de interactie tussen Myosine- en Actine-eiwitten. De spierkracht is afhankelijk van de lengte zoals dat is weergegeven in figuur 3.6 en figuur 1.7. De grootte van de kracht kan gemanipuleerd worden met de stimulatie.
- d_{stim} : De demping van de spier. De kracht is afhankelijk van de snelheid van verlenging of verkorting van de spier zoals dat is weergegeven in figuur 3.6 en 1.8. De grootte van de kracht kan gemanipuleerd worden met de stimulatie.
- d_{rest} : De andere dempende factoren in de muizepoot als gevolg van bijvoorbeeld de demping veroorzaakt door andere spieren en/of de wrijving in de gewrichten.

In de modellering is de invloed van de spier als het aangegeven spierkoppel ' T_{sp} ' verwerkt.

Ook is verondersteld dat de koppeling tussen motoras en encoderas oneindig stijf is, omdat deze in serie staat met de motoras die veel slapper is. De discretisatie van de encoder is nog niet in dit model aangegeven. Over de invloed hiervan wordt in paragraaf 3.4.5 nog een beschouwing gegeven.

3.4.2 De modellering van het lage resolutie servosysteem

In figuur 3.7 en figuur 3.8 is respectievelijk het blokschema van het lage resolutie servosysteem en het dynamisch model weergegeven. Dit blokschema is bijna identiek aan het blokschema van het hoge resolutie servosysteem, met als enige verschil dat de encoder een andere plaats inneemt.

De volgende criteria zijn gebruikt voor de keuze van de motoren:

- De motor voor metingen aan de scheenspier moet minimaal een koppel kunnen leveren van 8 mNm.
- De motor voor metingen aan de kuitspier moet minimaal een koppel kunnen leveren van 40 mNm.
- De motor moet een zo laag mogelijke massa draagbaarheid hebben.
- Het aantal segmenten van de commutatie moet zo hoog mogelijk zijn ten behoeve van een zo klein mogelijke koppelrimpel bij rotatie.

De volgende motoren zijn gekozen:

- scheenspiermeting: Maxon Re 013-035-11 EAB 1.01 A
- kuitspiermeting: Maxon Re 025-055-38 EBA 2.01 A

De voor de modellering relevante motorparameters zijn weergegeven in tabel 3.1.

Tabel 3.1 Motorparameters

	Maxon Re 013-035-11 EAB 1.01 A	Maxon Re 025-055-38 EBA 2.01 A
Inductantie L [H]	$0.75 \cdot 10^{-3}$	$0.83 \cdot 10^{-3}$
Weerstand R [Ohm]	21.1	8.03
Motorconstante k_{em} [Nm/A]	$12.9 \cdot 10^{-3}$	$43.8 \cdot 10^{-3}$
Massa draagbaarheid Rotor J_{spo} [kg·m ²]	$0.502 \cdot 10^{-7}$	$10.1 \cdot 10^{-7}$
Stijfheid k_{uit} [Nm/rad]	5.02	25.7
Stijfheid k_{enc} [Nm/rad]	1.00	10.7

De resterende onbekende massa draagbaarheden zijn weergegeven in onderstaande tabel 3.2.

tabel 3.2

	Het hoge resolutie servosysteem	Het lage resolutie servosysteem
J_{uit} [kg·m ²]	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$
J_{enc} [kg·m ²]	$8 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$

3.4.5 Een beschouwing ten aanzien van de encoderresolutie

Een hoekafwijking is noodzakelijk voor de werking van het regelsysteem. Door de eindige resolutie van een discrete encoder, is het bij een servosysteem met een dergelijke encoder mogelijk om een beweging van de motoras te maken zonder dat de uitgang van de encoder een wijziging aan de regeling doorgeeft. Door deze eigenschap is de stijfheid van de servomotor theoretisch binnen één encoderstap gelijk aan nul. De motor levert dan geen tegenkoppel bij belasting. Tenzij het servosysteem in een statische meting zonder lastkoppel volledig in evenwicht is, en er geen storing van buitenaf optreedt, zal er altijd een minimale afwijking bestaan. Deze afwijking is minimaal gelijk aan de grootte van een halve encoderstap. Het regelsysteem reageert op deze afwijking door een motorkoppel te genereren. Wanneer er geen tegenkoppel aanwezig is, zal er beweging in de hoek aanwezig zijn. Dit fenomeen wordt ook 'Digital Jitter' genoemd. Als aan de stabiliteitscriteria van Nyquist is voldaan, zal de beweging niet tot instabiliteit leiden.

Bij dynamisch meten (een sinusvormige beweging van de voethoek) treedt Digital Jitter niet op. Bij een samplefrequentie van 1 kHz komen er tussen twee samples bij een bewegingsfrequentie van 6 Hz en een amplitude van 45° gemiddeld zo'n 20 encoderstrepen voorbij. De gemeten fout in de hoek vanwege de encoderresolutie is kleiner dan een halve encoderstap en is klein ten opzichte van de totaal voorbijgekomen hoek in de sample-tijd. De fout in de hoekmeting is een toevallige fout en de onnauwkeurigheid vertaalt zich in witte ruis. Deze witte ruis zal een statistisch gedrag vertonen waardoor de encoderafwijking door middeling kleiner wordt. Bij een samplefrequentie van 1 kHz treedt de grootste energie-inhoud van deze ruis op bij een frequentie die ver boven de bandbreedte van het systeem ligt (100 ~ 200 Hz) en het systeem ondervindt zodoende geen negatieve gevolgen van de ruis.

Tijdens statisch meten zal de regeling actief zijn vanwege Digital Jitter. De overdrachtsfunctie tussen spierkoppel en motorhoek geeft de servostijfheid. Deze stijfheid vermenigvuldigd met de grootte van een halve encoderstap geeft de afwijking van de koppelmetering bij statisch meten als gevolg van Digital Jitter. De afwijking als gevolg van Digital Jitter wordt groter bij verhoging van de versterkingsfactor. Bij statisch meten vormt dit een beperkende factor voor het opvoeren van de versterkingsfactor en hiermee dus het verkleinen van andere onnauwkeurigheden in het systeem.

3.4.6 De stabiliteit

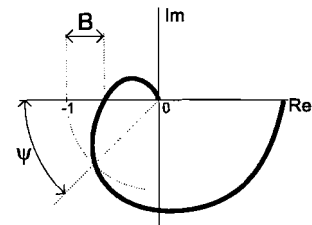
In de regelaar is een instelling noodzakelijk van de dempingsconstante τ_d en de versterking k . Er is sprake van een zogenaamde PD-regelaar omdat de integratieconstante oneindig groot gekozen is, zodat deze geen invloed meer heeft op het systeem. Dit is gedaan omdat er sprake is van een dynamisch systeem en een statische fout in de hoek geen invloed heeft op de nauwkeurigheid van de koppelmetering. Een integrator veroorzaakt tevens een faseverschuiving en heeft zodoende een negatieve invloed op de dynamische eigenschappen en de stabiliteit van het systeem.

Met het verhogen van de versterkingsfactor is het mogelijk de nauwkeurigheid van het systeem te verhogen. Uit de gestelde nauwkeurigheidseisen volgt dan ook de versterkingsfactor k . De instelling van de bijbehorende dempingsfactor τ_d is bepaald aan de hand van de stabiliteitscriteria van Nyquist.

Volgens Nyquist is de stabiliteit van een gesloten regelketen gegarandeerd, als het punt -1 op de reële as links van de polaire figuur van de rondgaande overdrachtsfunctie ligt, wanneer deze figuur van lage naar hoge frequenties wordt doorlopen. Voor de stabiliteit van het systeem is het gunstig wanneer het snijpunt met de reële as niet te dicht bij het punt -1 ligt (amplitudemarge). Tevens moet het punt -1 op voldoende afstand gepasseerd worden (fasemarge)(figuur 3.9).

Bij een acceptabel regelgedrag gelden de Nyquistcriteria:

- amplitudemarge $B = 0.45$
 - fasemarge $\psi = 45^\circ$
- (TUE-diktaat Werktuigkundige Regeltechniek 1, J.J. Kok, 1991)



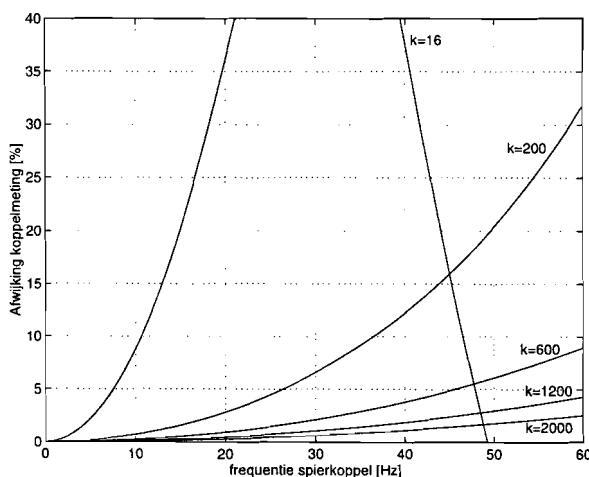
Figuur 3.9 Fase- en amplitudemarge

Voor elk ontwerp is onderzocht bij welke instelling van de regelparameters precies voldaan is aan de nyquistcriteria. Deze instellingen met bijbehorende nyquist-diagrammen zijn weergegeven in bijlage 8. De diagrammen moeten volgens de nummering doorlopen worden.

3.4.7 De instelling van de regelparameters voor de verschillende ontwerpen

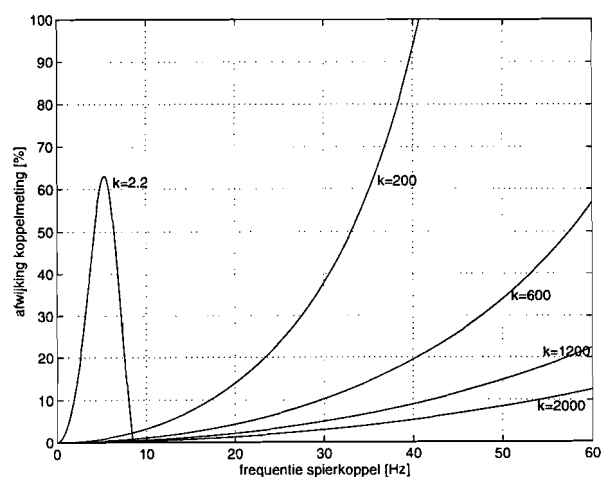
3.4.7.1 De instelling van de hoge resolutie servosystemen

In dit ontwerp zijn bij een instelling van de regelaar volgens de Nyquistcriteria (zie paragraaf 2.4.6) de onnauwkeurigheden te groot om een dynamisch koppel van 50 Hz te kunnen meten. Om een grotere nauwkeurigheid te halen moet de versterking van de regellus worden vergroot (zie figuur 3.10 en 3.11).

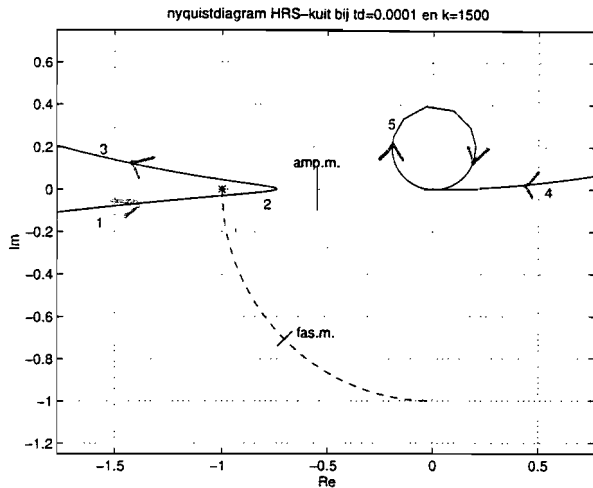


Figuur 3.10 Kuitspiero ontwerp

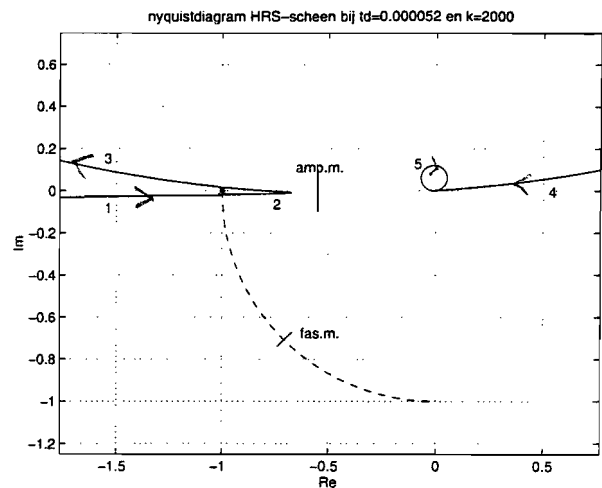
Afwijking koppelmetering bij verschillende versterkingsfactoren van de hoge resolutie servosystemen



Figuur 3.11 Scheenspiero ontwerp

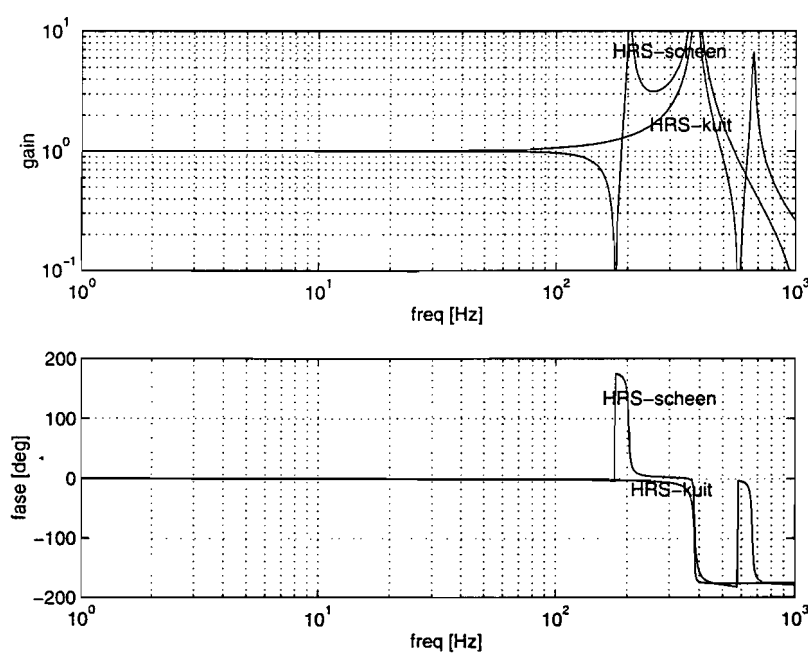


Figuur 3.12 Kuitspieroontwerp
Nyquistdiagrammen van de hoge resolutie servosystemen met de gekozen instellingen



Figuur 3.13 Scheenspieroontwerp
Nyquistdiagrammen van de hoge resolutie servosystemen met de gekozen instellingen

Bij versterkingen groter dan 2000 is volgens het Nyquistdiagram het systeem voor het kuitspieroontwerp instabiel. Voor het scheenspieroontwerp geldt dit voor versterkingen groter dan 2900. Om in de buurt te komen van de nauwkeurigheidseisen (Hoofdstuk 1, paragraaf 1.4) is een zo groot mogelijke versterking noodzakelijk. Met een veilige marge in verband met de instabiliteit is voor het kuitspieroontwerp gekozen voor een versterkingsfactor van 1500 en voor het scheenspieroontwerp een versterkingsfactor van 2000. In onderstaande figuur 3.14 zijn de bodediagrammen uitgezet van de overdrachtsfunctie tussen de gewenste hoek ϕ_g en de hoek van de spoelen ϕ_{spo} . In figuur 3.12 en 3.13 zijn de Nyquistdiagrammen uitgezet, die bij de instellingen horen. In de diagrammen is de amplitude marge ('amp.m.') en de fasemarge ('fas.m.') met behulp van een deel van de eenheidscirkel (gestreept) volgens de Nyquistcriteria weergegeven. De diagrammen dienen van lage naar hoge frequenties volgens de nummering doorlopen te worden.



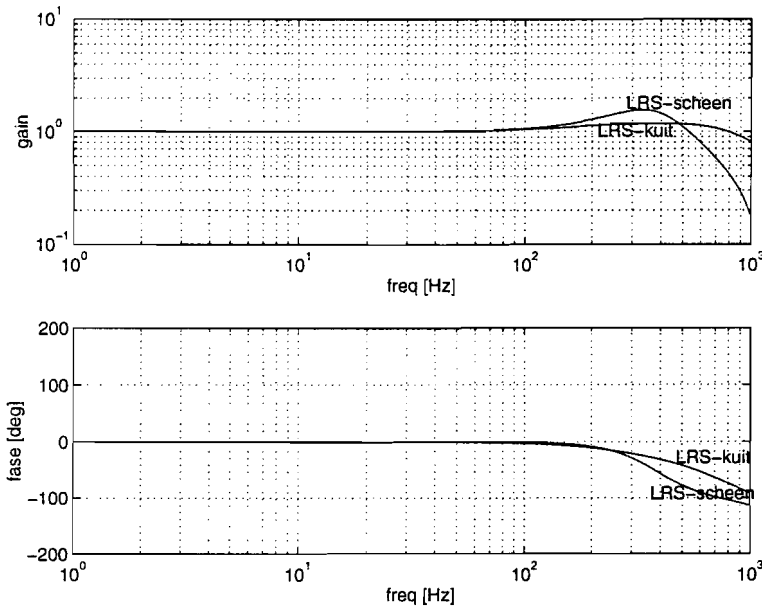
Figuur 3.14 Bodediagrammen van de overdrachtsfunctie tussen de gewenste hoek ϕ_g en de spoelhoek ϕ_{spo} van de hoge resolutie servosystemen met de gekozen instellingen

Aan de Nyquistdiagrammen is te zien dat de instellingen verre van optimaal zijn met betrekking tot de stabiliteitscriteria van Nyquist. Tevens zijn in het amplitude-deel van de bodediagrammen hoge pieken te zien waaruit blijkt dat het systeem een slechte stabiliteit heeft. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de PID-regelaar niet voldoet en dat een uitgebreidere regeling met hogere orde filters noodzakelijk is.

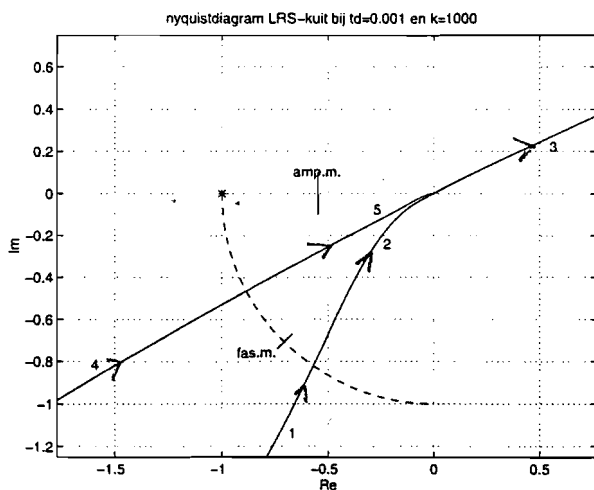
Bij een fase-achterstand van 180° zal de speelhoek ϕ_{spo} in tegenfase reageren op de gewenste hoek ϕ_g . Het servosysteem is dan onbruikbaar geworden. Wanneer de amplitude van het ingangssignaal niet goed wordt doorgegeven (afwijking 3 dB = $1/\sqrt{2}$) is er ook sprake van een onbruikbaar servosysteem. Deze factoren zijn bandbreedte bepalend. Uit de bodediagrammen van figuur 3.14 is een bandbreedte van ± 190 Hz gevonden voor het kuitspiero-ontwerp en ± 150 Hz voor het scheenspiero-ontwerp.

3.4.7.2 De instelling van de lage resolutie servosystemen

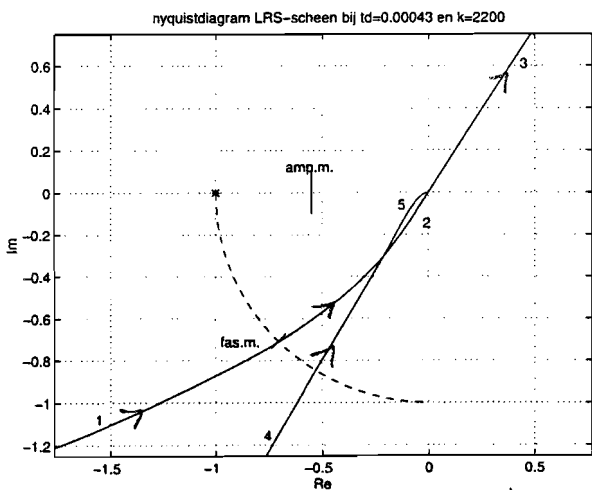
Voor de lage resolutie servosystemen geldt dat de versterking k begrensd is om de invloed van de encorderdiscretisatie zo klein mogelijk te houden. Er is gekozen voor een versterking waarbij de onnauwkeurigheid van de meting van een dynamisch koppel van 50 Hz, 2% bedraagt. Voor het kuitspiero-ontwerp betekent dit een versterking van 1000 en voor het scheenspiero-ontwerp betekent dit een versterking van 2200. In figuur 3.15 zijn de bodediagrammen uitgezet met in figuur 3.16 en 3.17 de bijbehorende Nyquistdiagrammen.



Figuur 3.15 De bodediagrammen van de overdrachtsfunctie tussen de gewenste hoek ϕ_g en de speelhoek ϕ_{spo} van de lage resolutie servosystemen



Figuur 3.16 Kuitspiero-ontwerp



Figuur 3.17 Scheenspiero-ontwerp

Nyquistdiagrammen van de lage resolutie servosystemen met de gekozen instellingen

Volgens de Nyquist criteria voldoet in deze ontwerpen de gemodelleerde PD-regelaar om een voldoende stabiel systeem te maken. De gevonden bandbreedte voor het kuitspieroontwerp is gelijk aan ± 100 Hz. Als gevolg van de niet volledig gemodelleerde tijdsvertragingen van het systeem (bijv. besturingskaart, versterker) zal deze bandbreedte in werkelijkheid wat lager liggen. Om te voorkomen dat de encodernauwkeurigheid invloed zal hebben op het systeem tijdens dynamisch meten moet de samplefrequentie van de besturingskaart hoger zijn dan deze bandbreedte. Een samplefrequentie van ruim boven 1 kHz is hier gewenst. De bandbreedte van het scheenspieroontwerp is gelijk aan ± 200 Hz.

3.5 De nauwkeurigheid van de koppelmetering en de beweging van de verschillende ontwerpen

Het gemeten motorkoppel is een koppel dat ontstaan is door verschillende factoren. De motor moet de massastraagheid van het systeem versnellen om tot beweging te komen. Een wrijvingskoppel moet hierbij overwonnen worden. Wanneer tenslotte de muis het systeem belast met een spierkoppel moet het systeem een tegenkoppel bieden om de gewenste hoek van het servosysteem te behouden. Omdat er alleen interesse bestaat voor het spierkoppel, moet er voor het versnellingskoppel gecorrigeerd worden, en moet het wrijvingskoppel zo klein mogelijk zijn.

Verder bestaat er een bepaalde afwijking van de werkelijke hoek van de motoras en de gewenste hoek. De oorzaak ligt enerzijds in het feit dat het servosysteem met een bepaalde nauwkeurigheid een gewenste hoekstand en beweging verwezenlijkt. Anderzijds is er het spierkoppel dat het systeem belast en daardoor een bepaalde afwijking in de hoekstand introduceert. In de volgende paragrafen komen de nauwkeurigheden van zowel de koppelmetering als de beweging aan de orde.

3.5.1 Correctie voor het versnellingskoppel

Om een bepaalde beweging te genereren is een versnelling nodig. Omdat deze beweging met een bepaalde nauwkeurigheid bekend is, evenals de massastraagheid, is het mogelijk voor het versnellingskoppel een correctie uit te voeren.

In onderstaande tabel 3.3 zijn de maximaal optredende versnellingen (bij een bewegingsfrequentie van 8.5 Hz en een amplitude van 45°) terug te vinden van de verschillende ontwerpen. Voor de massastraagheid van de voet van de muis is als bovenschatting $1 \cdot 10^{-7}$ kg·m² genomen.

Tabel 3.3 De relevante grootheden voor het versnellingskoppel

	J [10 ⁻⁷ kg·m ²]				$\dot{\omega}$ [rad/sec ²]	T _{acc} [mNm]	% van bereik
	Rotor	Muis	Enc.	Tot			
HRS-kuitspieroontwerp	10	1	8	19	2240	4.3	11 %
HRS-scheenspieroontwerp	0.5	1	8	9.5	2240	2.1	26 %
LRS-kuitspieroontwerp	10	1	1	12	2240	2.7	6.8 %
LRS-scheenspieroontwerp	0.5	1	1	2.5	2240	0.56	7.0 %

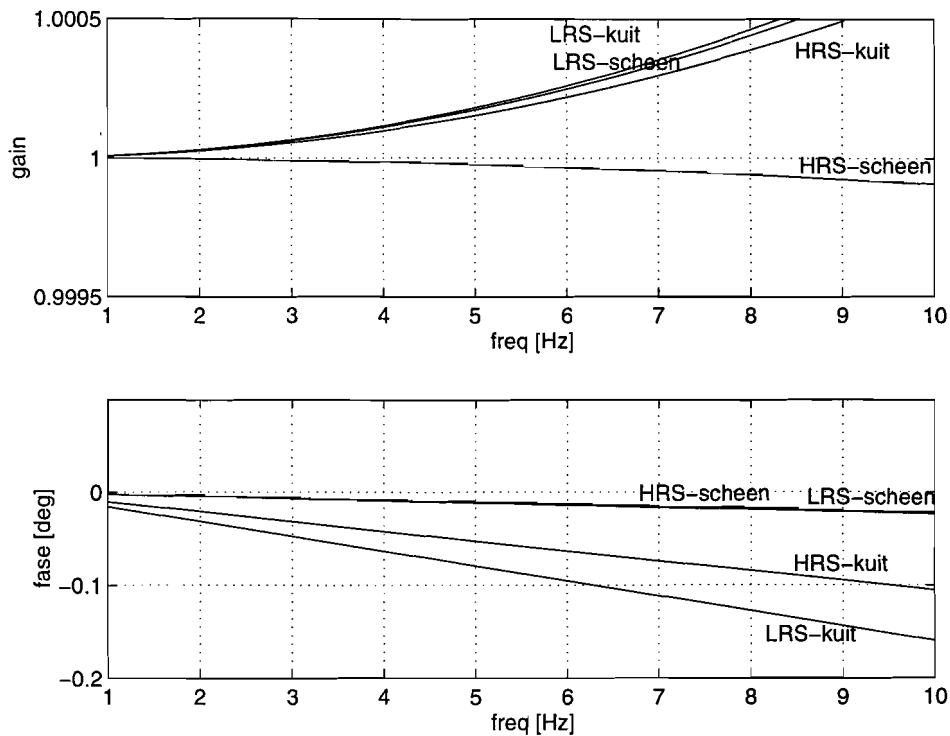
HRS = hoge resolutie servosysteem , LRS = lage resolutie servosysteem

Om invloeden van massastraagheden te kunnen verwaarlozen moet een correctie van minimaal 95 % van het versnellingskoppel plaatsvinden.

Verondersteld dat de massastraagheid van de ontwerpen exact bekend is, zijn er drie verschillende mogelijkheden om de voor de correctie benodigde hoekversnellingen te berekenen:

1. De hoekversnelling kan berekend worden aan de hand van de gewenste hoek ϕ_g . Bij deze methode veroorzaakt de faseverschuiving in het systeem het belangrijkste deel van de fout die gemaakt wordt. Uit de

blokschema's is de overdrachtsfunctie bepaald tussen de versnelling van de gewenste hoek ϕ_g en de versnelling van de spoelhoek ϕ_{spo} . De bodediagrammen zijn weergegeven in onderstaande figuur 3.18.



Figuur 3.18 Het verschil in versnelling tussen gewenste hoek en gerealiseerde hoek

Omdat de fasedraaiingen die sommige blokken uit de blokschema's veroorzaken niet volledig gemodelleerd zijn, moeten de afwijkingen die te zien zijn in figuur 3.18 beschouwd worden als onderschattingen.

2. Een andere methode is het berekenen van de hoekversnelling door tweemaal differentiëren van de gemeten spoelhoek. Hier schuilt het gevaar dat de ruis van de gemeten spoelhoek bij dubbele differentiatie wordt versterkt. Dit maakt deze methode minder interessant. Fase-achterstand is hier echter niet aanwezig.
3. De derde optie is het filteren van de gemeten spoelhoek, opdat er geen ruis meer in het signaal aanwezig is, en vervolgens de gefilterde spoelhoek tweemaal te differentiëren.

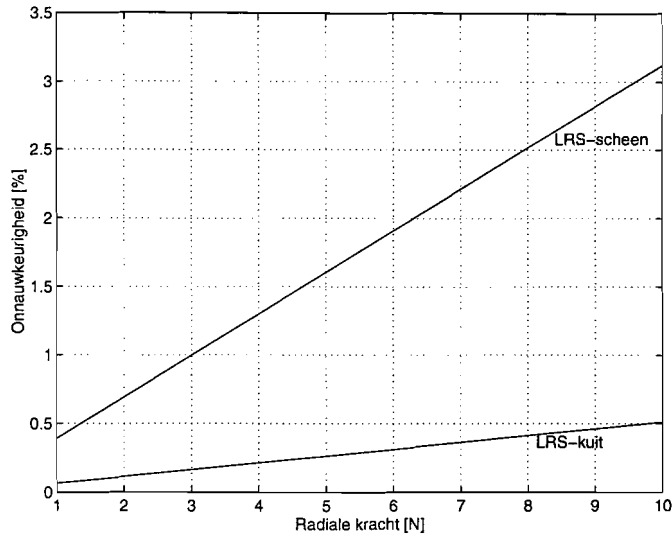
De praktijk zal uitwijzen welke methode om voor het versnellingskoppel te corrigeren het meest geschikt is.

3.5.2 Wrijving

Er is gebruik gemaakt van precisie-groefkogellagers van de firma MPB-Europa. De lagers veroorzaken volgens de fabrikant bij de start van een rotatie de grootste wrijving. De lagers uit de ontwerpen hebben een wrijvingskoppel van $\pm 1.5 \cdot 10^{-2}$ mNm per lager bij een radiaal gerichte kracht van 0.75 N, en een koppel van $\pm 5.0 \cdot 10^{-2}$ mNm bij een kracht van 4 N (MPB-catalogus p.72)

Bij ontwerp 1 is er ook een wrijvingskoppel van de lagering van de encoder aanwezig. Deze is volgens de leverancier echter niet bekend. Door de radiaal slappe koppeling tussen motoras en encodersas zullen radiale krachten op de encoderlagers echter gering zijn.

Een schatting van het percentage onnauwkeurigheid door wrijving van het totale bereik is in onderstaande figuur 3.19 weergegeven voor ontwerp 2. Deze onnauwkeurigheden zijn als gevolg van de extra encoderlagering groter voor ontwerp 1. In bijlage 9, 'De wrijvingsberekening', is uiteengezet hoe deze schatting tot stand is gekomen.

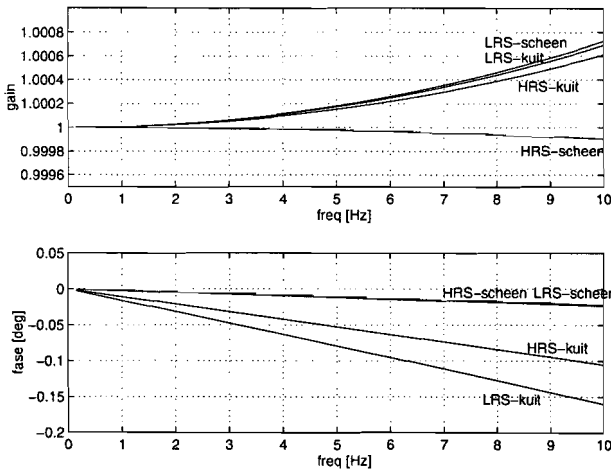


Figuur 3.19 Onnauwkeurigheid in de koppelmetering door wrijving als functie van de radiale kracht

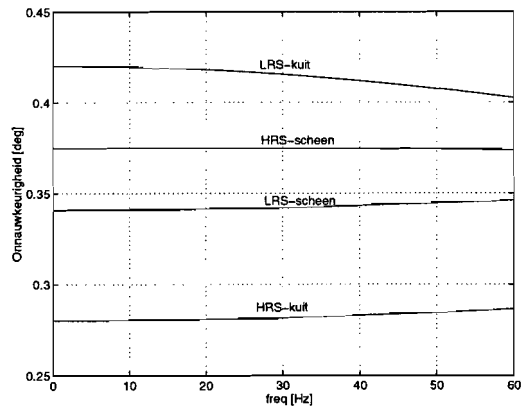
Uit deze grafiek blijkt het van belang te zijn dat de radiale kracht geleverd door de muis zo klein mogelijk moet zijn. Hiermee is rekening gehouden bij de fixatie van de muis.

3.5.3 De nauwkeurigheid van de beweging

De nauwkeurigheid waarmee de gewenste rotatie wordt uitgevoerd door het servosysteem is bepaald uit de overdrachtsfunctie van de hoek ϕ_g naar de hoek ϕ_{spo} . Het bodediagram van deze overdrachtsfunctie laat de versterking van de amplitude van een sinusvormig signaal zien en de faseverschuiving tussen het gewenste signaal en het gerealiseerde signaal. Er is sprake van een vergroting en verschuiving van een sinusvormige rotatie, maar geen vervorming van de sinusbeweging. In figuur 3.20 is het bodediagram weergegeven. De faseverschuiving heeft de grootste invloed op de hoekonnauwkeurigheid.



Figuur 3.20 Bodediagram van de overdrachtsfunctie tussen ϕ_g en ϕ_{spo} voor verschillende bewegingsfrequenties



Figuur 3.21 Hoekafwijking ϕ_{spo} door het maximale spierkoppel bij verschillende spierkoppel-frequenties

Het ontwerp met de grootste afwijking is het lage resolutie systeem voor de kuitspiermeting vanwege de grote fasedraaiing bij een bewegingsfrequentie van 8.5 Hz. De hoekafwijking door deze fasedraaiing is afhankelijk van de voethoek van de muis. Bij dit ontwerp is er sprake van een afwijking van 0.08° .

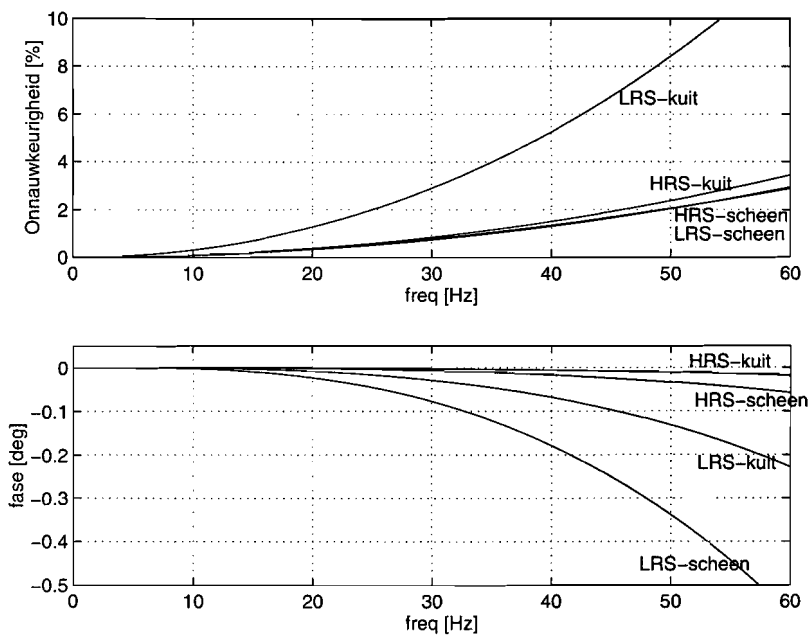
Het spierkoppel werkt als een soort stoorsignaal op het systeem en heeft dus invloed op de mate waarmee een gewenste beweging kan worden gerealiseerd. De grootte van de verstoring van de spoelhoek ϕ_{spo} door het

spierkoppel T_{sp} is bepaald aan de hand van de overdrachtsfunctie tussen beide grootheden. Er is sprake van een vervorming van de gewenste sinusvormige beweging. De verstoring is afhankelijk van het spierkoppel. In figuur 3.21 is de grootte van de verstoring voor de verschillende spierkoppel-frequenties gegeven voor de verschillende ontwerpen. Dit is gedaan bij de maximaal te meten spierkoppels afhankelijk van het ontwerp.

Opnieuw treedt de grootste afwijking in de hoek door het spierkoppel op bij het lage resolutie systeem voor de kuitspiermeting. De maximale afwijking bedraagt 0.42° . De totale maximale hoekfout die kan ontstaan is volgens deze berekeningen dus gelijk aan 0.50° en ligt daarmee dus ruim onder de eis.

3.5.4 De nauwkeurigheid van de koppelmeting

De nauwkeurigheid waarmee het spierkoppel wordt gemeten is enerzijds afhankelijk van de frequentie waarmee het spierkoppel verandert. Deze is bepaald uit de overdrachtsfunctie tussen het spierkoppel en het motorkoppel. De procentuele onnauwkeurigheid in de grootte van het spierkoppel en de faseverschuiving zijn weergegeven in figuur 3.22.



Figuur 3.22 Onnauwkeurigheid van het gemeten koppel als functie van de spierkoppelfrequentie

Anderzijds is de nauwkeurigheid van het gemeten spierkoppel afhankelijk van de frequentie van de hoekbeweging. In paragraaf 3.3.4 is de encoderresolutie nader beschouwd. Hieruit bleek dat de grootste afwijking ten gevolge van de encoderresolutie (Digital Jitter) optreedt wanneer de hoek in de tijd niet verandert (statisch meten). Bij dynamisch meten treedt dit verschijnsel niet op. Tabel 3.4 geeft de onnauwkeurigheid in het gemeten koppel tijdens statisch meten bij de gekozen regellus-versterkingen.

Tabel 3.4 Meetfout tijdens statisch meten voor de verschillende ontwerpen

	Meetfout bij statisch meten [mNm]	Percentage van bereik
HRS-kuitspiermeting	0.64	1.6 %
HRS-scheenspiermeting	0.096	1.2 %
LRS-kuitspiermeting	4.3	10.8 %
LRS-scheenspiermeting	1.0	12.5 %

HRS = hoge resolutie servosysteem , LRS = lage resolutie servosysteem

3.6 Conclusie

Allereerst wordt er een vergelijking gemaakt van de in dit hoofdstuk besproken ontwerpen. Daarna zullen algemene conclusies behandeld worden ten aanzien van het mechatronische concept van koppelmeting.

3.6.1 Een vergelijking van beide ontwerpen

De bandbreedtes van de lage resolutie servosystemen liggen bij de gekozen versterkingen hoger dan bij de hoge resolutie servosystemen. Deze hogere bandbreedtes zijn te verklaren uit het feit dat de encoder ongeveer een tien maal zo lage massa-traagheid heeft en op een zeer stijve manier bevestigd is aan de aandrijving. De laagste mechanische eigenfrequenties liggen hierdoor dus veel hoger dan bij de hoge resolutie systemen. De maximaal haalbare regellus-versterkingen, waar de bandbreedte en daarmee de dynamische eigenschappen van het systeem sterk van afhankelijk zijn, zijn bij de hoge resolutie systemen hierdoor noodgedwongen veel lager.

Het lage resolutie servosysteem verdient bij dynamische metingen de voorkeur vanwege de onderstaande eigenschappen:

- Door de hoge bandbreedtes van de lage resolutie servosystemen is de nauwkeurigheid van koppelmeting bij dynamische koppels en bij beweging van de voet met hoge rotatiesnelheden veel groter dan bij de hoge resolutie servosystemen.
- Vanwege de goede stabiliteits-eigenschappen van de lage resolutiesystemen, voldoet een PID-regeling. Om van de hoge resolutie systemen een goede stabiliteit te verkrijgen is een regeling met hogere orde filters dan PID noodzakelijk
- In de hoge resolutie systemen is de werking van de laser-encoder bij hoge snelheden niet meer gegarandeerd. Bij de lage resolutie systemen zijn hoge bewegings-snelheden van de voet juist vereist (schatting: sinus minimaal bewegingsfrequentie 4 Hz, amplitude 40°), om te voorkomen dat de encoderresolutie invloed op het servosysteem krijgt (Digital Jitter).
- De lage resolutie servosystemen zijn het meest compact.
- Er is geen extra lagering aanwezig van de encoder.

Het hoge resolutie servosysteem verdient bij statische metingen de voorkeur vanwege de onderstaande eigenschap:

- De hoge resolutie systemen hebben bij lage bewegings-snelheden vanwege de hoge resolutie van de laser-encoder geen last van Digital Jitter en bezitten hierdoor bij laagfrequente metingen een zeer hoge nauwkeurigheid.

3.6.2 Algemene conclusies ten aanzien van het concept

- Om een zo klein mogelijke faseverschuiving ten gevolge van de digitale regelaar te realiseren, is een zo groot mogelijke samplefrequentie gewenst (>1 kHz) en een zo klein mogelijk servo-update tijd (<50 µsec). Hierdoor wordt de meetnauwkeurigheid vergroot.
- Om wrijvingsinvloeden te kunnen verwaarlozen dient de door de muis geleverde radiale kracht op de motoras klein te zijn. Bij de fixatie van de muis dienen geen extra radiale krachten geïntroduceerd te worden.
- Correctie voor het versnellingskoppel is met alle ontwerpen ruim voldoende mogelijk.
- De gewenste nauwkeurigheid van de hoekpositie wordt door alle ontwerpen gehaald.

4. De muisfixatie

In het onderzoek gaat de interesse uit naar de spierkracht als functie van de spierlengte van de kuit- of de scheenspier van de muis. Deze gegevens bieden de mogelijkheid de verrichte bewegingsarbeid en daaruit het vermogen van de spier te berekenen. Het is van belang dat er een nauwkeurige relatie gelegd kan worden tussen het gemeten koppel en de spierkracht, en tussen de hoekverdraaiing van de motoras van het meetinstrument en de spierlengte-verandering. De fixatie van de muis speelt een grote rol in hoe nauwkeurig deze relaties tot stand komen.

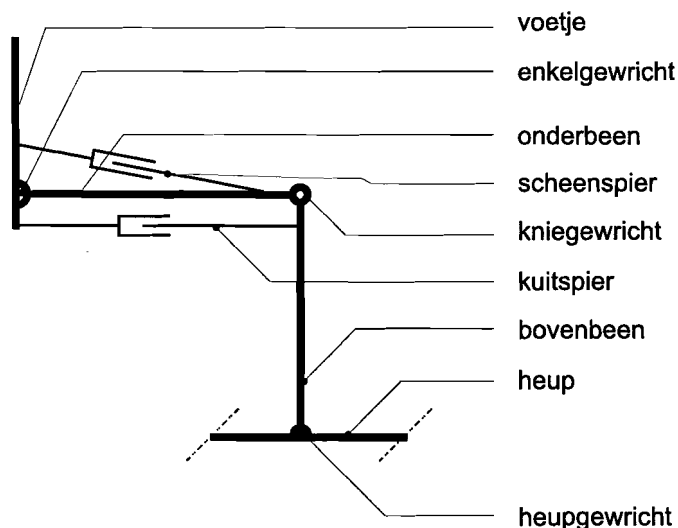
Het fixeren van de muis betekent het vastleggen van een reeds aanwezige structuur van biologisch materiaal. Van de verschillende te onderscheiden elementen in de muizepoot hebben de botten relatief de hoogste stijfheid. Een goede benutting van deze stijfheid levert de meest stijve fixatie op.

Voor de fixatie is het van belang dat de muis een zo gering mogelijke chirurgische ingreep ondergaat. Herstelprocessen kunnen anders het normaal functioneren van de muis beletten, wat bij chronische experimenten de resultaten kan beïnvloeden. Bij een fixatie met behulp van de botten dient ervoor gezorgd te worden dat het weefsel om de botten zo weinig mogelijk beschadigd wordt.

In dit hoofdstuk wordt het ontwerp besproken van de muisfixatie. Dit is gedaan aan de hand van de structuur van een muizepoot en een daarvan afgeleid stangenmodel. Een prototype van deze muisfixatie is gebouwd door de Centrale Technische Dienst van de TUE. Met dit prototype zijn een aantal experimenten uitgevoerd waarvan de resultaten kort besproken zullen worden.

4.1 De muizepoot

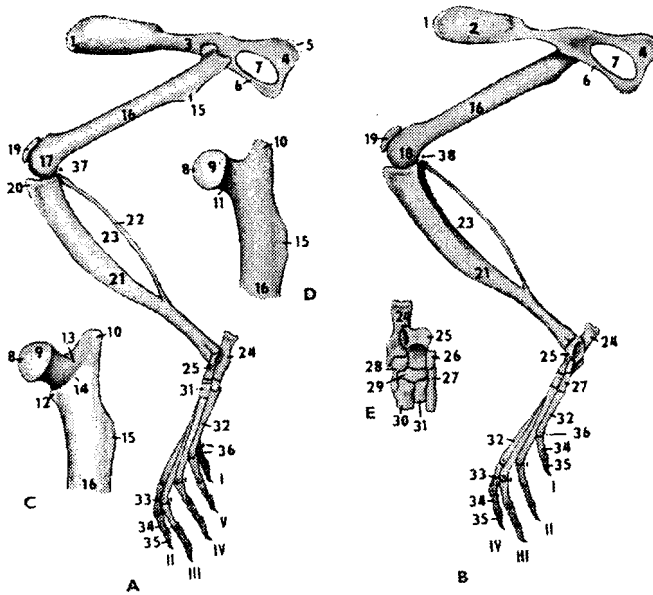
Een vereenvoudigd model van een muizepoot waarin de belangrijke elementen zijn weergegeven is te zien in figuur 4.1.



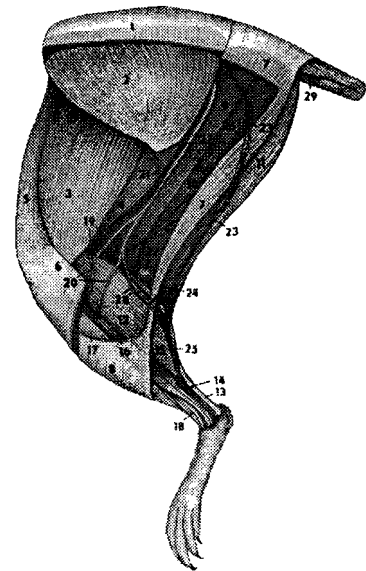
Figuur 4.1 Model van een muizepoot

Zoals in de figuur te zien is, is een belangrijk verschil tussen kuit- en scheenspier dat deze spieren niet aan dezelfde botten gehecht zitten. De kuitspier kan krachten uitoefenen tussen bovenbeen en voet, de scheenspier tussen onderbeen en voet.

In figuur 4.2 is de werkelijke structuur van het bottenstelsel van een muizepoot te zien. In figuur 4.3 is de ligging van de spieren weergegeven.



Figuur 4.2 Het bottenstelsel van een muizepoot (Popesko, 1992)



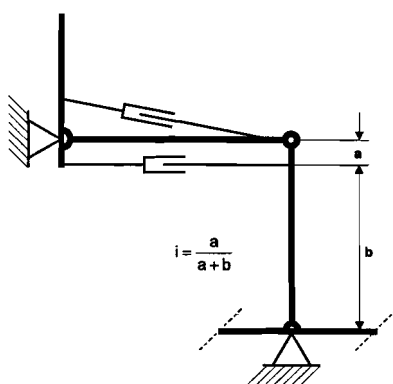
Figuur 4.3 De ligging van de spieren in een muizepoot (Popesko, 1992)

In figuur 4.2 zijn de heup (1-7), het bovenbeen (16), het onderbeen (21-23) en de voet (24-36) te onderscheiden. In figuur 4.3 zijn de kuitspier (12) en de scheenspier (17) te zien.

4.2 Het fixatie principe

De spierkrachten door de scheenspier en de kuitspier moeten zich vertalen in koppels om het enkelgewricht. Daarbij moet de hoek tussen voet en onderbeen, de 'voethoek', een maat zijn voor de spierlengtes. De lengte van de scheenspier is afhankelijk van de voethoek. De lengte van de kuitspier is afhankelijk van de voethoek en van de kniehoek.

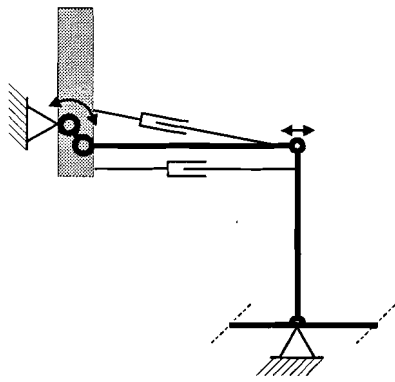
Met de fixatie moeten zowel de scheen- als de kuitspier gemeten kunnen worden. Dit is mogelijk als de positie van het enkelgewricht en het heupgewricht vastliggen. De spierkracht van beide spieren wordt dan omgezet in een koppel rondom de enkelas. Tevens is dan de voethoek een maat voor de spierlengte (figuur 4.4).



Figuur 4.4 Muizepoot met vaste heup- en enkelpositie

Rotatie van het bovenbeen om het kniegewricht moet voorkomen worden door de fixatie van het heupgewricht. Hiervoor is het gunstig dat de afstand van het aanhechtingspunt van de kuitspier tot het kniegewricht zeer klein ($a < 0.5 \text{ mm}$) is ten opzichte van de afstand tot het heupgewricht ($b \approx 17 \text{ mm}$). Als gevolg hiervan is namelijk de kracht op de heupfixatie (F_{heup}) als gevolg van een spierkracht van de kuitspier (F_{kuit}) zeer klein ($F_{\text{heup}} = i \cdot F_{\text{kuit}}$). Tevens is dan de spierlengte verandering (Δl) veel kleiner dan een verplaatsing (Δx) van het heup-gewricht door de eindige stijfheid van de fixatie ($\Delta l = i \cdot \Delta x$). Het resultaat hiervan is dat de stijfheid van de fixatie ter plaatse van de aanhechting van de kuitspier een factor i^2 groter wordt waargenomen (Constructieprincipes).

De lagering van de motoras van het meetinstrument moet de positie van de enkelas vastleggen. Omdat er sprake is van twee rotatieassen bestaat er een excentriciteit tussen de enkelas en de motoras, mede omdat de plaats van de rotatieas van de enkel door de geometrie van dit gewricht (Ashton-Miller et al, 1992) afhankelijk is van de voethoek. Door deze excentriciteit wordt de fixatie van de muizepoot beschreven door een vierstangenmodel zoals weergegeven in figuur 4.5.



Figuur 4.5 Vier stangenmodel als gevolg van excentriciteit

Het gemeten koppel wijkt in dit nieuwe model af van het spierkoppel in de enkelas. In bijlage 10, 'Het krachterspel in de muizepoot', is het krachterspel in de muizepoot berekend aan de hand van het vierstangenmodel. De gemeten afwijking door de excentriciteit bedraagt bij een voethoek van 90° :

$$e = \frac{ad}{bc + ac + ad} \cdot 100\%$$

met a = afstand aanhechting kuitspier tot kniegewricht
 b = afstand aanhechting kuitspier tot heupgewricht
 c = momentsarm kuitspier tot enkelgewricht
 d = excentriciteit enkelgewricht tot motoras
 e = onnauwkeurigheid als gevolg van de excentriciteit

Met de volgende aannamen:

$a = 0.5$ mm, $b = 17$ mm, $c = 2$ mm, $d = 0.5$ mm,

is er sprake van een gemeten afwijking van 0.7 %, hetgeen volgens de eisen (1%) acceptabel is.

De excentriciteit resulteert in een beweging van de knie. Deze beweging heeft maximaal de grootte van de excentriciteit en is zeer klein (< 0.5 mm (schatting)). Door deze beweging worden de volgende afwijkingen geïntroduceerd:

- 1) Er is een versnellingskoppel nodig voor de beweging.
- 2) De wrijving in de muis die bij de beweging optreedt moet overwonnen worden.
- 3) De spierlengte verandert door de hoekvariatie in de knie.

Ad 1) De massa muizepoot : $m = 1.8 \cdot 10^{-3}$ [kg] (Meting)
 De maximale bewegingsfrequentie : $f_{\max} = 8.5$ [Hz] (Eisen)
 De excentriciteit : $d = 0.5$ [mm] (Aanname)
 De maximale versnelling : $a_{\max} = 4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot A = 0.71$ [m/sec²]
 Het versnellingskoppel : $T = m \cdot a_{\max} \cdot d = 6 \cdot 10^{-7}$ [Nm] = $6 \cdot 10^{-4}$ [mNm]
 Het gevonden koppel is verwaarloosbaar klein ten opzicht van het spierkoppel.

Ad 2) De wrijving in de gewrichten is geminimaliseerd, omdat er gebruik gemaakt is van de aanwezige biologische lagering.

Ad 3) De maximale hoekvariatie in de knie met bovenstaande aannamen: 1.7° .
 De maximale spierlengte-verandering door de hoekvariatie : 0.01 mm.
 Deze spierlengte-verandering is verwaarloosbaar klein ten opzichte van de spierlengte-verandering door andere effecten zoals de rek in de pezen bij contractie van de spier (Geusen, 1996).

Bovenstaande beschrijving gaat uit van de werking van het vier stangenmodel. Voor een onbelemmerde werking van dit model is het van belang dat de beweging van het kniegewricht niet wordt verhinderd.

4.3 Het ingieten van de muizevoet

Extra aandacht vraagt de voet van de muis. Omdat deze uit een groot aantal kleine botten bestaat die allen ten opzichte van elkaar bepaalde vrijheidsgraden bezitten (zie figuur 4.3) is de voet flexibel en slap. De voet lijkt dus geenszins op de stijve voet zoals die voorgesteld is in het model van figuur 4.1. Tevens bevinden zich onder de voet zogenaamde 'voetkussens', die onder belasting vervormen.

Om het model van figuur 4.1 te benaderen is het noodzakelijk de interne vrijheidsgraden in de voet te onderdrukken en een zo homogeen mogelijke krachtsverdeling op de voet tijdens spiercontractie te realiseren. Beide eisen worden verwezenlijkt door de voet in te gieten in een blokje (Rosielle, 1996).

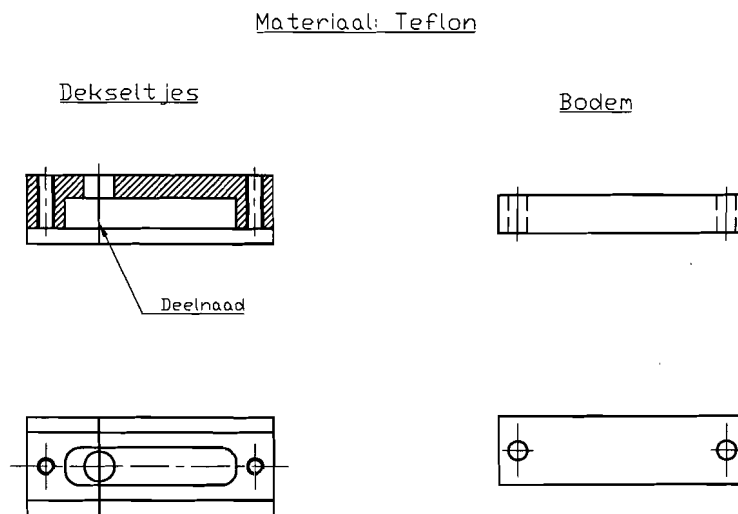
Dit blokje moet van een stof zijn met een lage dichtheid, en hoeft niet veel groter te zijn (<1 mm verschil) dan de afmetingen van de voet. De lage massastraagheid ($<1 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$) die op deze manier bereikt wordt heeft een positieve invloed op de nauwkeurigheid van het meetinstrument.

Het blokje biedt ook meer mogelijkheden dan de voet voor fixatie aan de meetunit. Dit komt de reproduceerbaarheid van de bevestiging van de voet aan het meetinstrument ten goede. De excentriciteit tussen motoras en enkelas kan op deze manier in de hand gehouden worden.

Bij het ingieten wordt gebruik gemaakt van een gietmal en gietmateriaal. Deze worden in de volgende paragrafen behandeld.

4.3.1 De Gietmal

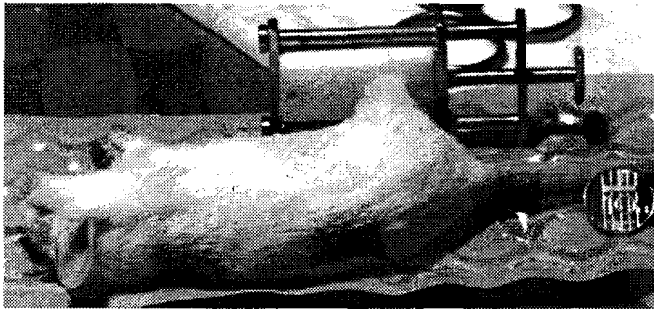
De gietmal is weergegeven in figuur 4.6.



Figuur 4.6 De gietmal voor het ingieten van de muizevoet, schaal 1:1

De voet wordt vastgezet door de enkel met behulp van een klem tussen de twee dekselhelften in het daarvoor bestemde gat te klemmen. De voet bevindt zich dan in de gietholte. Het intussen geprepareerde gietmateriaal wordt in de gietholte gegoten c.q. gesmeerd. Na controle op luchtbellen kan de voet in de gietholte van de deksel worden geduwd. De bodem wordt daarna op het deksel geduwd en daarmee komt het overtollige gietmateriaal door de spleten van de gietmal naar buiten. De bodem kan eventueel met twee boutjes aan de dekselhelften geschroefd worden. In figuur 4.7 is een foto afgebeeld waarop de muis onder narcose met zijn voet in de gietmal zit. Dit is het proces van uitharden. Na het uitharden kan de voet met het blokje uit de gietmal genomen worden (figuur 4.8).

Bij de dimensionering van de gietholte is rekening gehouden met het realiseren van een lage massastraagheid van de voet met het blokje. Het gietvolume is geminimaliseerd aan de hand van de afmetingen van muizevoeten. Vanwege de biologische spreiding in de lengte van muizevoeten is er echter aan de voorkant en aan de achterkant van de voet wat meer ruimte in de gietmal aanwezig.



Figuur 4.7 De muis tijdens de uitharding van het blokje om het voetje



Figuur 4.8 De muis met het ingegoten voetje

Om te kunnen werken met gietmaterialen met hechtende eigenschappen (bijv. epoxylijm) en om een goede lossing van het gegoten klompje uit de gietmal te verkrijgen is voor de gietmal het materiaal Teflon gekozen. Tevens is Teflon steriliseerbaar en heeft goede eigenschappen wat betreft reiniging.

4.3.2 Het gietmateriaal

Het gietmateriaal moet aan de volgende eisen voldoen:

- **Dichtheid** : De dichtheid bepaalt de massatraagheid van het schoentje. Deze moet zo klein mogelijk zijn.
- **Uithardtijd** : Gestreefd wordt naar een uithardtijd tussen 10 en 20 minuten. Een langere uithardtijd is niet gewenst vanwege de beperkte duur van narcose van de muis. Een kortere uithardtijd vergroot de kans op fouten tijdens het ingieten.
- **Viscositeit** : Een zeer geringe viscositeit is niet gewenst vanwege het weglekken van gietmateriaal uit de spleten van de gietmal. Een hoge viscositeit is niet gewenst omdat het overtollige gietmateriaal zich dan niet laat wegpersen bij het sluiten van de gietmal.
- **Sterkte** : De sterkte van het materiaal is van belang voor het lossen van het blokje met voetje uit de gietmal. Bij een te lage sterkte breekt het blokje.
- **Maximale temperatuur** : De voet van de muis mag geen schade ondervinden als gevolg van de temperatuur. Als grenswaarde is de temperatuur genomen waaraan de huid van de mens kan worden blootgesteld. Dit is ongeveer 60° Celsius.
- **Verwijdering** : Vanwege de eis van chronische proeven, mag het ingieten het functioneren van de muis niet beïnvloeden. Praktisch gezien betekent dit dat na de meting het blokje verwijderd moet kunnen worden van de voet. De verschillende manieren zijn smelten, oplossen, en mechanisch verwijderen. Bij smelten mag de smeltemperatuur niet hoger zijn dan 60° Celsius. Een oplosproces mag niet langer duren dan ± 60 minuten. Mechanisch verwijderen moet een beheerst proces zijn. Mogelijkheden voor smelten en oplossen zijn materiaal afhankelijk. Een mechanisch proces vraagt een creatieve oplossing.

Aan de hand van deze eisen zijn een aantal experimenten met verschillende materialen uitgevoerd waarvan de resultaten zijn weergegeven in tabel 4.1. Deze experimenten zijn gedaan om binnen korte termijn een zo goed mogelijk gietmateriaal te vinden en de resultaten zijn gebaseerd op indrukken, afschattingen en grove metingen.

Van de verschillende geteste materialen bleek Paladur (tandarts cement) het meest geschikt. Paladur is echter een thermoharder en voor de verwijdering van het Paladur moet nog een methode ontwikkeld worden.

Tabel 4.1 Eigenschappen van de verschillende gietmaterialen

Manier van uitharden	Materiaal	dichtheid	Uithardtijd	Viscositeit	sterkte	max. temperatuur [°c]	Verwijdering	Opmerkingen
Verdamping	Hobby-lijm	+	--	++	?	20	+	*
	UHU-plast	+	--	--	?	20	+	*
2-Componen	Epoxylijm	++	48 uur	++	++	50	-	
	Technovyt	++	10 min	+	++	60	-	
	Gips	-	24 uur	--	--	40	0	
	Paladur	++	10 min	+	++	40	-	
Stollen	Sucrose (1)	+	30 sec	0	0	95	++	oplosbaar
	Sucrose (2)	+	30 sec	0	0	100	++	oplosbaar
	Mannose	+	3 min	0	0	80	++	oplosbaar
	Glucose	+	30 sec	0	0	100	++	oplosbaar
	Was	+	10 min	-	-	65	0	smelten
	Kaarsvet	++	10 min	0	-	65	0	smelten

Van -- = zeer slecht tot ++ = zeer goed

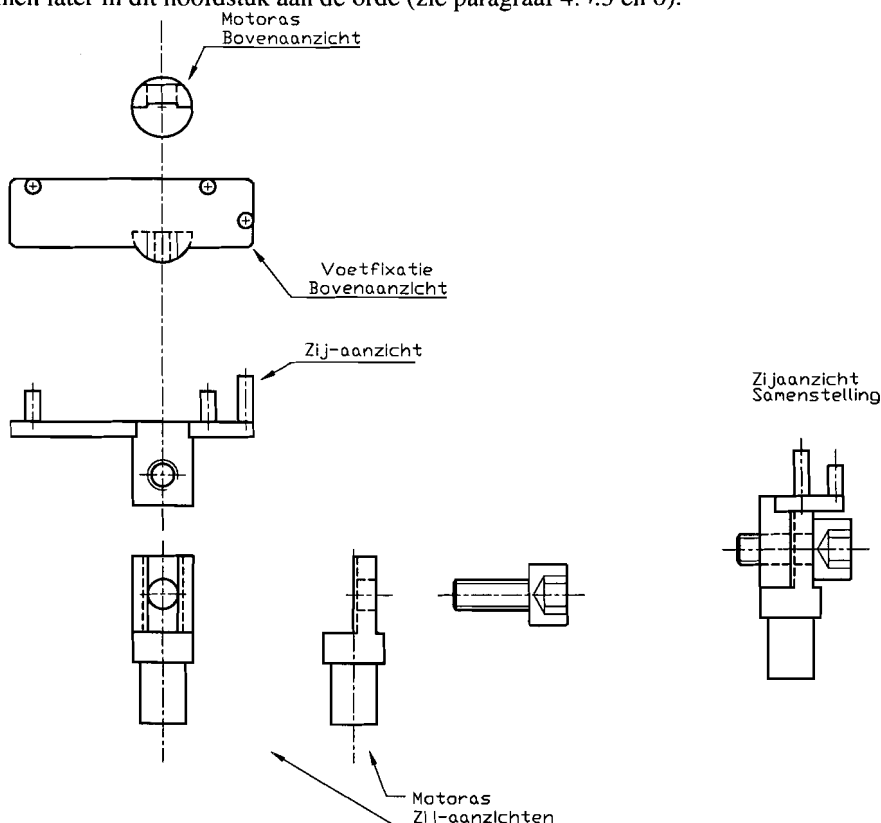
Opmerkingen : * Vanwege de slechte mogelijkheid van verdamping uit de gietmal zijn deze materialen niet geschikt.

4.4 De voetfixatie

De fixatie van het gegoten blokje om de muizevoet aan de motoras van de meetunit gebeurt met behulp van een voetfixatie, zoals weergegeven in figuur 4.9.

Het gegoten blokje wordt met behulp van secondelijm op de voetfixatie gelijmd. Daarbij wordt het blokje gepositioneerd door de drie pennen op de voetfixatie. Met een M2 imbus boutje kan de voetfixatie aan de motoras van de meetunit gemonteerd worden. Om het lossen van het blokje van de voetfixatie te bespoedigen moet er zeer weinig lijm gebruikt worden. Omdat de lijm oplosbaar is kan een oplosmiddel zoals aceton gebruikt worden om de voetfixatie te reinigen.

De schroefdraad voor het M2 imbusboutje is aangebracht in de voetfixatie en niet in de motoras. Bij eventuele beschadiging van de schroefdraad dient dus de fixatie vervangen te worden. De voetfixatie is gerealiseerd door de instrumentmakerij van de Centrale Technische Dienst van de Technische Universiteit Eindhoven. Testen van deze fixatie komen later in dit hoofdstuk aan de orde (zie paragraaf 4.5.3 en 0).



Figuur 4.9 De voetfixatie met de bevestiging aan de motoras, schaal 2:1

4.5 De staartfixatie

Het vastleggen van het heupgewricht zoals beschreven in paragraaf 4.2 wordt gerealiseerd met een staartfixatie. Door een trekkracht uit te oefenen op de staart van de muis is het mogelijk om de wervelkolom een kracht op de heup te laten uitoefenen. Door op deze manier de heup met behulp van de staart op een aanslag te trekken is het mogelijk de positie van het heupgewricht vast te leggen (Dekkers, Rosielle, 1996).

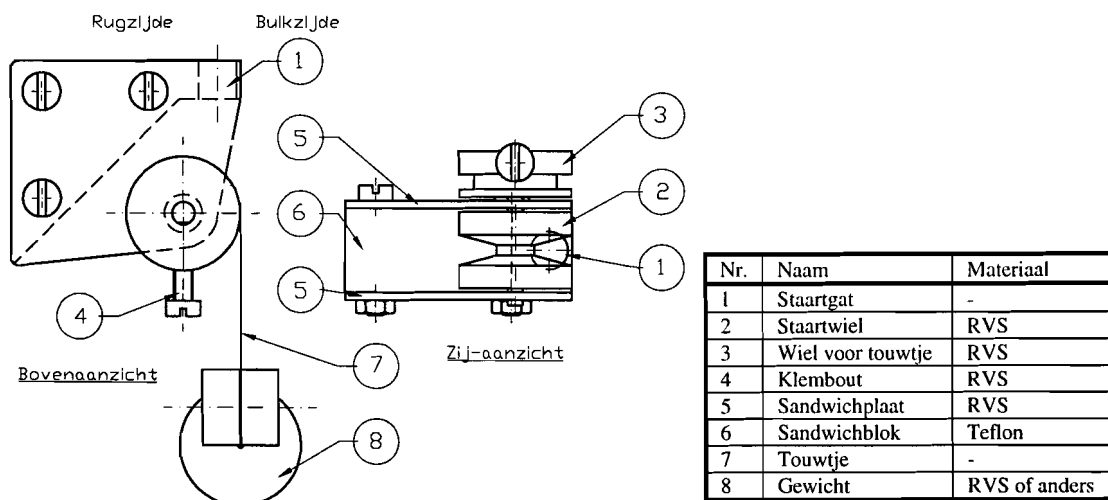
Om dit te bewerkstelligen is een staartfixatie ontworpen, waarvan het eerste prototype gerealiseerd is door Dhr. E. Reker en het tweede prototype door de Centrale Technische Dienst van de Technische Universiteit Eindhoven. Met deze prototypes zijn proeven gedaan. Aan de hand van de resultaten is een derde prototype ontworpen. In de volgende paragrafen zullen de drie prototypes en de experimenten behandeld worden.

4.5.1 Prototype 1

Het eerste ontwerp van de staartfixatie is weergegeven in figuur 4.10.

De staart van de muis wordt door het staartgat (1) gestoken. De oriëntatie van de muis daarbij is in de figuur aangegeven met 'buikzijde' en 'rugzijde'. De punt van de staart wordt met behulp van dubbelzijdig tape in de V-vormige gleuf van het staartwiel (2) vastgemaakt. De staart kan dan opgerold worden (op de tekening van figuur 4.10 rechtersom). Om een tweede wiel (3) wordt een touwtje (7) gewikkeld. De bevestiging van dit touwtje aan het wieltje is mogelijk met een uitstekend boutje (4). Aan het andere eind van het touwtje kunnen gewichten (8) aangebracht worden, waardoor het touwtje wordt voorgespannen. Door deze werkwijze is het mogelijk een constante en gedefinieerde kracht in de staart aan te brengen.

Het asje van het staartwiel is gelagerd in twee dunne roestvrij stalen platen (5), zodat een sandwichconstructie ontstaat (Constructieprincipes). Tussen deze platen bevindt zich een Teflon afstandsblok. Het Teflon is ook in dit geval gekozen vanwege de goede eigenschappen wat betreft reiniging en sterilisatie.



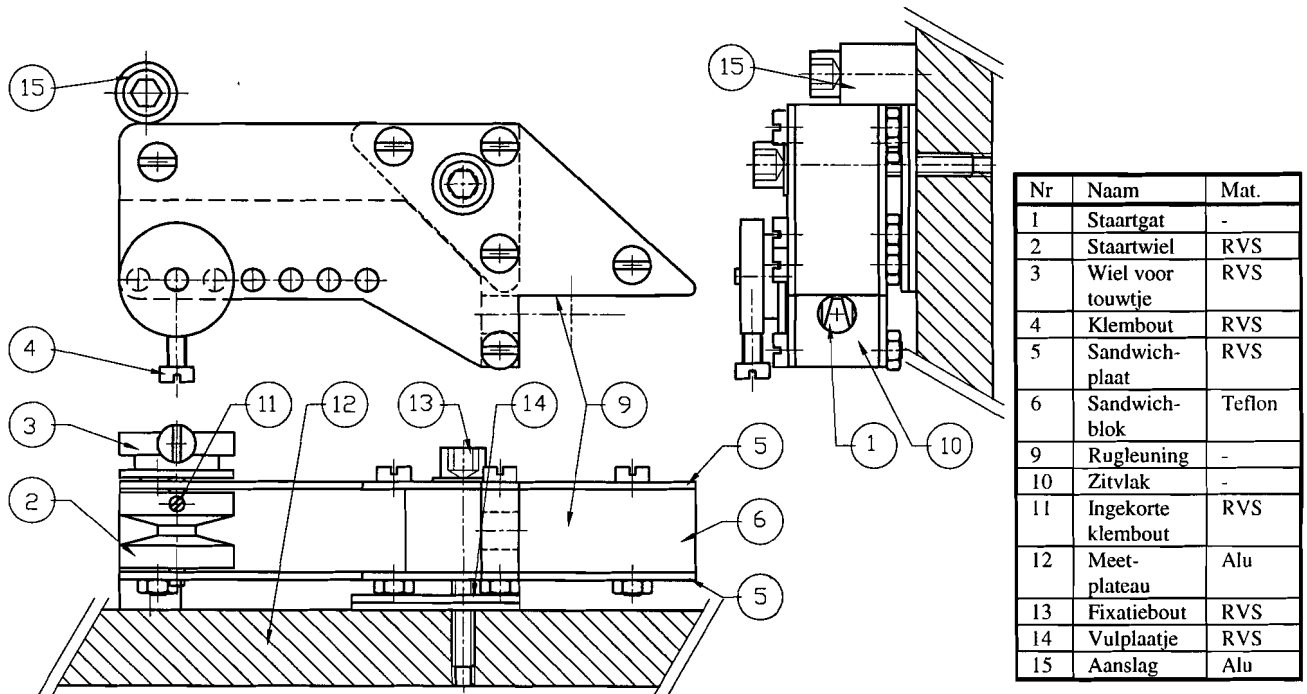
Figuur 4.10 Staartfixatie 1, schaal 1:1

Experimenten met dode muizen hebben de volgende inzichten opgeleverd:

- De afmetingen van de staartfixatie zijn niet geschikt om alle soorten muizen van alle leeftijden te kunnen fixeren.
- De muis heeft de neiging om een positie in te nemen teveel naar de rugzijde. Er bevindt zich dan meer slap weefsel tussen de heup en de aanslag dan wanneer de muis meer naar de buikzijde ligt. Dit is nadelig voor de stijfheid van de fixatie.
- De aanslag van de heup aan de buikzijde vóór het staartgat (1) is te kort.

4.5.2 Prototype 2

Uit de inzichten van de experimenten met het prototype van staartfixatie 1, is een tweede ontwerp voortgekomen. Dit ontwerp is weergegeven in figuur 4.11.

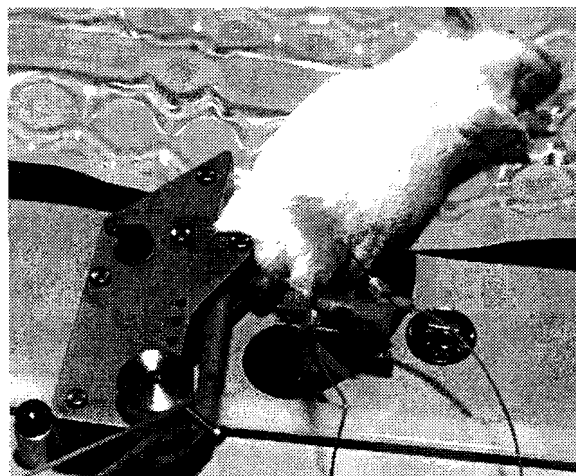


Figuur 4.11 Staartfixatie 2, schaal 1:1

In dit ontwerp is een rugleuning (9) toegevoegd die de neiging van de muis om naar rugzijde te gaan liggen moet onderdrukken. Het 'zitvlak' (10) is langer gemaakt om de heup beter te laten aanliggen. Tevens is het mogelijk gemaakt om het staartwiel (2) naar andere posities te verplaatsen, om zoveel mogelijk verschillende muizen te kunnen fixeren.

Het verplaatsen van het staartwiel wordt mogelijk door het boutje (11), waarmee het staartwiel op het asje geklemd zit, los te draaien. Het wiel (3) voor het touwtje kan dan samen met het asje uit het gat genomen worden. In omgekeerde volgorde is het mogelijk de wielen in een andere positie te monteren.

De staartfixatie is op een aluminium plaat (12) gemonteerd met één bout (13). De hoogte van de staartfixatie kan bepaald worden met behulp van vulplaatjes (14). De stand van de staartfixatie wordt bepaald door een aanslag (15), maar kan vanzelfsprekend ook met de hand in een andere gewenste stand worden gepositioneerd.

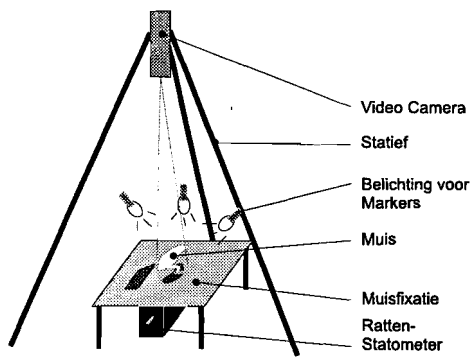


Figuur 4.12 Een gefixeerde muis met prototype 2

Om koppelmetingen te kunnen verrichten is de mogelijkheid ingebouwd om de reeds aanwezige rattenstatometer tegen de onderkant van de aluminium plaat te klemmen. Vanwege het bereik van dit meetinstrument (300 mNm) is deze echter niet geschikt voor zeer nauwkeurige metingen van muizen-spierkoppels. Voor de rattenstatometer is een soortgelijke voetfixatie als beschreven in paragraaf 4.4 gemaakt met een aangepaste bevestiging voor de meetas. In figuur 4.12 is een foto te zien van de muisfixatie tijdens een experiment.

4.5.3 Experimenten aan prototype 2 (deel I)

Beschrijving



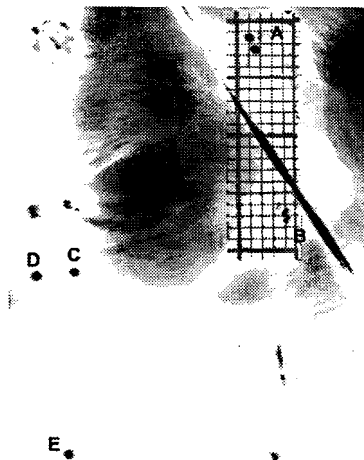
Figuur 4.13 Opstelling voor experiment

Met de constructie van prototype 2 zoals beschreven in de vorige paragraaf is een experiment uitgevoerd, om een indruk te krijgen van het functioneren van de muisfixatie. Er is gekeken naar de mate van beweging in heup-, knie- en enkelgewricht tijdens een maximale contractie van de kuitspier. Dit is gedaan door op verschillende botten in de muizepoot op verschillende plaatsen fluorescente markers te lijmen. Vervolgens zijn de belichte markers met behulp van één videocamera gefilmd tijdens de contractie. Met behulp van filters is het mogelijk een beeld te creëren waarin bijna uitsluitend de markers zichtbaar zijn. Met behulp van deze filters is het tevens mogelijk de positie van de zwaartepunten van de markers te bepalen. De proefopstelling is schematisch weergegeven in figuur 4.13.

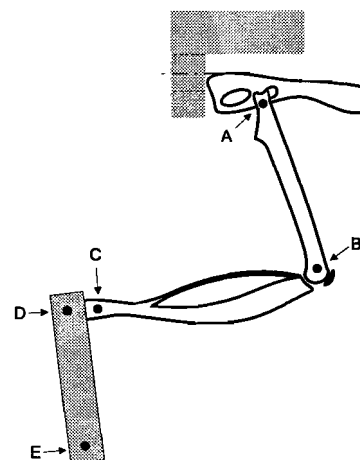
Resultaten

Bij de eerste proef bleek er een onverwacht grote beweging van de knie te zijn in de richting loodrecht op het vlak van koppelmeting ('meetvlak'). De grootte van deze beweging is echter onbekend vanwege het ontbreken van een tweede camera. Na deze waarneming is op verschillende manieren geprobeerd de beweging van de knie uit het meetvlak te verhinderen. De oorzaak van de kniebeweging is niet duidelijk. Wellicht is dit het gevolg van een contractie van de bovenbeenspieren.

De beelden van een proef die representatief zijn voor de gemiddelde bewegingen tijdens dit experiment zijn weergegeven in figuur 4.14. In deze proef is de beweging van de knie tegengegaan door een naald op het bovenbeen te leggen. De naald is in de beelden duidelijk te herkennen als de zwarte streep. Het beeld is tot stand gekomen door de opname van de rustsituatie op de opname van de contractie te projecteren. Als indicatie voor de grootte van de beweging is in deze figuur millimeterpapier afgebeeld. De letters bij de markers zijn terug te vinden in figuur 4.15, waar de posities van de markers op de botten zijn aangegeven. In de opgenomen beelden zijn ter plekke van de knie en het heupgewricht door de verplaatsing twee markers te zien. Op deze plaatsen is bij de markers van de opname tijdens contractie van de spier een twee geplaatst (de twee is slecht zichtbaar). Het maximaal gemeten spierkoppel bedroeg 13 mNm. Zwaartepunt-berekeningen ter bepaling van de verplaatsing van de markers hebben opgeleverd dat marker C, D en E allen minder dan 20 μm verplaatst zijn, marker B 0.91 mm, en marker A 1.3 mm. Door de beweging van de knie uit het meetvlak en de manier waarop getracht is deze beweging te onderdrukken is het bij deze experimenten niet mogelijk uitspraken te doen over bewegingen nauwkeuriger dan 20 μm .



Figuur 4.14 Beelden van de beweging van de markers tijdens experiment 1



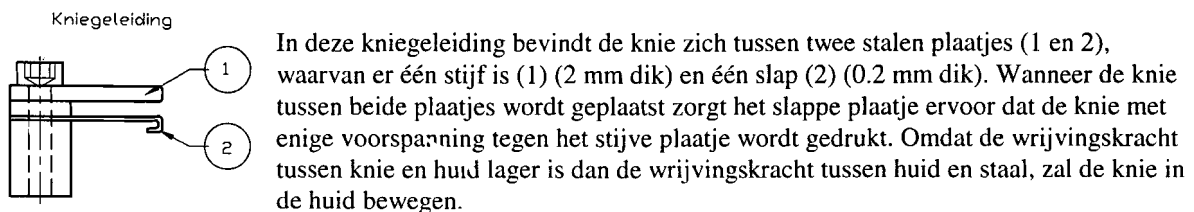
Figuur 4.15 Markerposities op de botten

Conclusies

- De zwaartepuntberekeningen tonen aan dat de beweging van het gegoten blokje zeer gering is vergeleken met de beweging van het heupgewricht en de afmetingen van de spier. De bevestiging van het blokje aan de meetas met behulp van secondelijm levert een goed resultaat op.
- De beweging van de enkels is eveneens zeer klein, en is van dezelfde grootte als de beweging van het gegoten blokje. Het ingieten levert een goed resultaat op.
- Er treedt een beweging van de knie op in de richting loodrecht op het meetvlak. Omdat alleen spierkrachten in het meetvlak als koppel gemeten worden, is dit onacceptabel.
- Er is duidelijk een beweging van het heupgewricht in de richting van de rug van de muis.

4.5.4 De kniegeleiding

De resultaten van experiment 1, beschreven in de vorige paragraaf, tonen aan dat het noodzakelijk is de beweging van de knie loodrecht op het meetvlak te verhinderen. Daarom is er gekozen om de knie te geleiden in het meetvlak. Daarvoor is een kniegeleiding ontworpen die is weergegeven in figuur 4.16.



Figuur 4.16 De kniegeleiding

Bij het geleiden van de knie is het van belang geen kracht in het meetvlak te introduceren. Deze kracht veroorzaakt een onnauwkeurigheid in het gemeten koppel. Door de voorspankracht van de kniegeleiding zo klein mogelijk te maken is de wrijvingskracht in door de kniegeleiding geminimaliseerd.

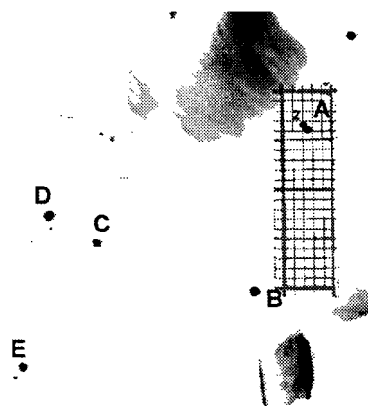
4.5.5 Experimenten aan prototype 2 (deel II)

Beschrijving

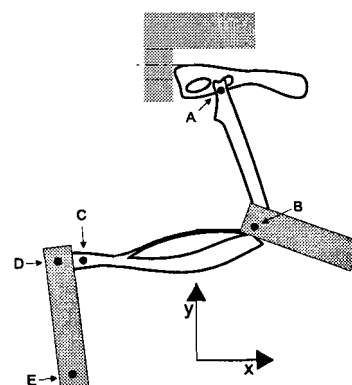
In de tweede sessie van experimenten ter bepaling van de functionering van de fixatie is dezelfde opstelling gebruikt als beschreven in paragraaf 4.5.3 (Experimenten aan prototype 2 (deel I)). Bij deze experimenten is ook de kniegeleiding gebruikt die beschreven is in de vorige paragraaf.

Resultaten

In figuur 4.17 zijn opgenomen beelden te zien van de beweging van de markers bij een maximaal spierkoppel van wederom 13 mNm. Het gebruikte voorspangewicht bij deze proef had een massa van 430 gram. De markers zijn bij dit experiment op andere plaatsen aangebracht vanwege de kniefixatie. In figuur 4.18 zijn deze markerposities weergegeven.



Figuur 4.17 Beelden van de beweging van de markers tijdens experiment 2



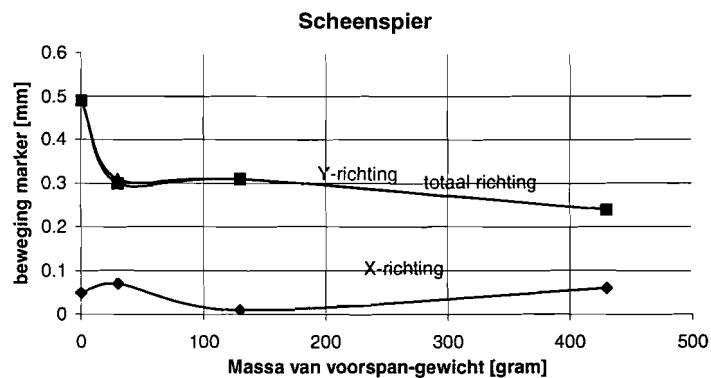
Figuur 4.18 Positie van de markers

Uit zwaartepunt-berekeningen zijn de verplaatsingen bepaald welke zijn weergegeven in onderstaande tabel 4.1.

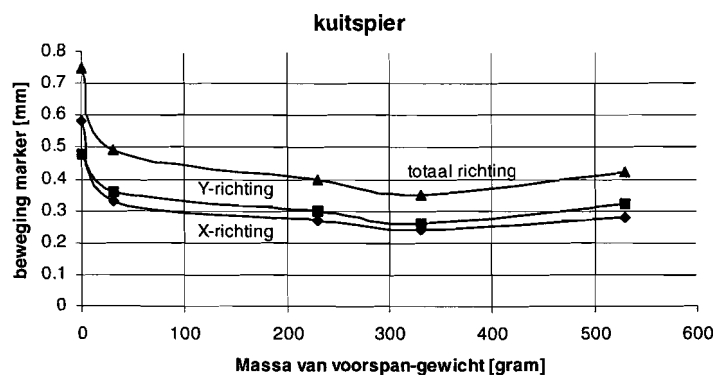
Tabel 4.1 Verplaatsingen van de markers uit figuur 4.17

Marker	Verplaatsing [μm]		
	x-richting	y-richting	Totaal
A	-290	350	460
B	10	0	10
C	0	-60	60
D	20	0	20
E	-30	0	30

Uit verschillende proeven is de relatie bepaald tussen de massa van het voorspangewicht van de staart, en de beweging van het heupgewricht. Deze relatie is in onderstaande figuren 19 en 20 weergegeven.



Figuur 4.19 De beweging van de markers als functie van het voorspangewicht voor de scheenspier



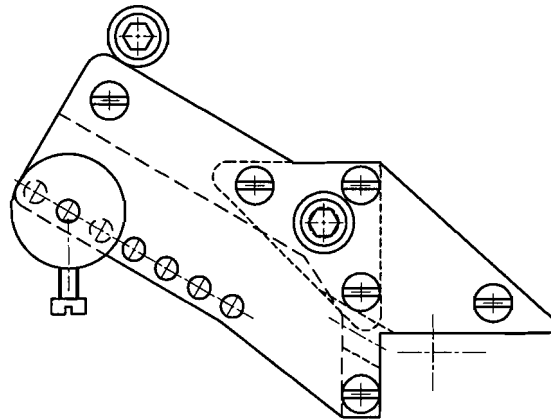
Figuur 4.20 De beweging van de markers als functie van het voorspangewicht voor de kuitspier

Conclusie

- In het heupgewricht is de beweging duidelijk kleiner dan de beweging tijdens de eerste sessie experimenten (zie paragraaf 4.5.3). Dit betekent dat de kniegeleiding een gunstig effect heeft op de muisfixatie.
- De beweging van de heupmarker in de richting van de rug van de muis is veel kleiner dan bij de eerste sessie experimenten maar nog steeds aanwezig.
- De minimale massa voor het voorspangewicht voor metingen aan de scheenspier bedraagt 50 gram.
- De minimale massa voor het voorspangewicht voor metingen aan de kuitspier bedraagt 300 gram.

4.5.6 Prototype 3

Aan de hand van de resultaten van de experimenten met het tweede prototype van de staartfixatie is een derde prototype ontworpen. Een bovenaanzicht van dit ontwerp is weergegeven in figuur 4.21.



Figuur 4.21 Prototype 3, schaal 1:1

De verschillen met prototype 2 zijn de volgende:

- De richting waarin de staart getrokken wordt staat onder een hoek met het zitvlak. Het is in dit ontwerp mogelijk de kracht in de staart te ontbinden in een kracht loodrecht op het 'zitvlak' en een kracht loodrecht op de 'rugleuning'. Het heupgewricht zal nu naar verwachting stijver vastliggen in de richting van de rug van de muis.
- Het zitvlak is 1.5 mm langer ten opzichte van prototype 2.
- De staart wordt linksom op het staartwiel gerold, gezien in het bovenaanzicht van de tekening in figuur 4.21.

4.6 Conclusie

Het model

De muizepoet is weergegeven in een model van stangen en scharnieren. In dit model is de voet van de muis vastgelegd aan de meetas en het heupgewricht vastgelegd aan de wereld. Met deze fixatie is een vierstangenmodel ontstaan, waarmee het theoretisch mogelijk is een spierkoppel te meten met de gewenste onnauwkeurigheid van 1%.

De voet

- Met het ingieten van de muizevoet moet het volgende bereikt worden:
 - 1 Een lage massatraagheid.
 - 2 Een goede krachtsverdeling op de voet.
 - 3 Het vastleggen van de interne vrijheidsgraden van de voet.
 - 4 Een reproduceerbare positionering ten opzichte van de meetas.
- Met de ontworpen gietmal en Paladur als gietmateriaal is het in de praktijk mogelijk om muizevoeten in te gieten.
- De experimenten met de videocamera hebben aangetoond dat de beweging van het gegoten blokje gelijmd aan de voetfixatie minimaal is ($< 20 \mu\text{m}$). De methode van lijmen voldoet.
- De experimenten hebben aangetoond, dat de beweging van de enkel ten opzichte van het gegoten blokje minimaal is ($< 20 \mu\text{m}$). Hiermee is ook in de praktijk bewezen dat het ingieten van de voet voldoet.
- Voor het verwijderen van het gietmateriaal van de voet moet nog een oplossing gevonden worden.

De staartfixatie

- Met de staartfixatie van de muis is een constructie ontworpen waarbij de chirurgische ingrepen ten behoeve van de fixatie van de muis tot een minimum zijn beperkt en waarmee chronische experimenten mogelijk zijn.
- De oorzaak van de kniebeweging uit het meetvlak is niet duidelijk. Wellicht is dit het gevolg van een contractie van de bovenbeenspieren.

5. Het totaalontwerp van het meetinstrument

5.1 De meetunits

In hoofdstuk 2 en 3 zijn verschillende ontwerpen behandeld waarmee een dynamisch spierkoppel gemeten kan worden. Deze ontwerpen, gebaseerd op twee verschillende concepten van koppelmetering, vertonen verschillen in de meetnauwkeurigheid van het spierkoppel en de positioneer-nauwkeurigheid van de gewenste hoek. Deze verschillen zijn afhankelijk van de meetcondities. In deze paragraaf zal worden gekozen welke meetunits voor het totaalontwerp van het meetinstrument het meest geschikt zijn voor realisatie.

Bij de beschouwing van de nauwkeurigheden in de hoofdstukken 2 en 3 is gebleken dat de eis van de hoeknauwkeurigheid in alle gevallen gehaald wordt. Bij de elastische koppelmetering wordt de onnauwkeurigheid in de hoek vooral bepaald door de vervorming van de relatief slappe koppelsensor als gevolg van het spierkoppel. De koppelsensor heeft dan een maximale hoekafwijking van $<1^\circ$ welke kleiner is dan de eis. In paragraaf 3.5.3 is van het mechatronische concept een maximale hoekonnauwkeurigheid berekend van 0.5° .

De dominante factor bij de keuze voor het te realiseren ontwerp vormt de meetnauwkeurigheid van het spierkoppel. Een vergelijk van deze meetnauwkeurigheden van de verschillende ontwerpen is voor de koppelmetering van de scheenspiër weergegeven in tabel 5.1 en voor de koppelmetering van de kuitspiër in tabel 5.2 (de gemiddelde waarden zijn weergegeven).

Voor het ontstaan van een meetonnauwkeurigheid bestaat er een principieel verschil tussen de elastische koppelsensoren en de mechatronische ontwerpen. Bij de elastische koppelsensoren vertaalt een hoekafwijking als gevolg van de sinusvormige beweging van de voet zich in een koppel. Het gevolg is dat de sensoren in statische metingen nauwkeuriger zijn dan in dynamische metingen. Vanwege de geringe rotatiestijfheid van de koppelsensoren voor meting aan de scheenspiër is het effect bij deze sensoren het grootst. In het mechatronische concept is deze beïnvloeding van de hoekonnauwkeurigheid door de voetbeweging op de meetnauwkeurigheid van spierkoppel niet aanwezig. In dit concept kan echter tijdens een statische meting een meetafwijking veroorzaakt worden door de beperkte resolutie van de encoder. Voor het mechatronische concept, en met name voor het lage resolutie ontwerp, geldt dus dat de nauwkeurigheid bij dynamische metingen groter is dan bij statische metingen.

Bij de bepaling van de nauwkeurigheden van de elastische koppelsensoren in tabel 5.1 en tabel 5.2 is uitgegaan van een foutloos positionersysteem, waarvan in de praktijk echter nooit sprake kan zijn. Gekozen is voor een servosysteem om een goede positioneer- en snelheidsnauwkeurigheid te kunnen behalen. Een zeer goed servosysteem met een hoge bandbreedte zal een nauwkeurigheid behalen in de buurt van de encoderresolutie. Deze afwijkingen zullen hoogfrequent zijn en daardoor een hoekverschil veroorzaken vanwege de relatief lage eigenfrequentie van de koppelsensor. Dit hoekverschil is verwaarloosbaar klein ten opzichte van het totale bereik van de voethoek, maar wordt door de inductieve sensoren als relatief groot koppel geïnterpreteerd. De meetonnauwkeurigheden worden door fouten in het positionersysteem nog vermeerderd met $\pm 5\%$.

Omdat vooral de dynamische metingen veel inzicht geven in het functioneren van de skeletspieren is hierbij een zo hoog mogelijke nauwkeurigheid gewenst. De tabellen 5.1 en 5.2 laten zien dat het mechatronische concept met lage resolutie bij dynamische metingen de beste resultaten oplevert. De lage resolutie van de Hewlett-Packard encoder levert tevens geen beperkingen op wat de bewegingssnelheid van de voet betreft. Voor de dynamische metingen is dus gekozen om de lage resolutie servosystemen van hoofdstuk 3 uit te werken voor het totaalontwerp van het meetinstrument.

Tabel 5.1 Vergelijkingstabel van de verschillende meetnauwkeurigheden voor de verschillende ontwerpen. In deze tabel zijn de waarden weergegeven voor meting aan de scheenspier.

		Statisch koppel		Dynamisch koppel	
		Statisch meten	Dynamisch meten	Statisch meten	Dynamisch meten
Koppelsensoren	TSF	< 1 %	4-9 %	3-7 %	7-10 %+
	Eigen ontwerp	< 1 %	4-8 %	2-5 %	6-10 %+
Mechatronische ontwerpen	Lage resolutie	>10 %	<1 %	> 10 %	2 %
	Hoge resolutie	1-2 %	1-2 %	9 %	9 %

Tabel 5.2 Vergelijkingstabel van de verschillende meetnauwkeurigheden voor de verschillende ontwerpen. In deze tabel zijn de waarden weergegeven voor meting aan de kuitspier.

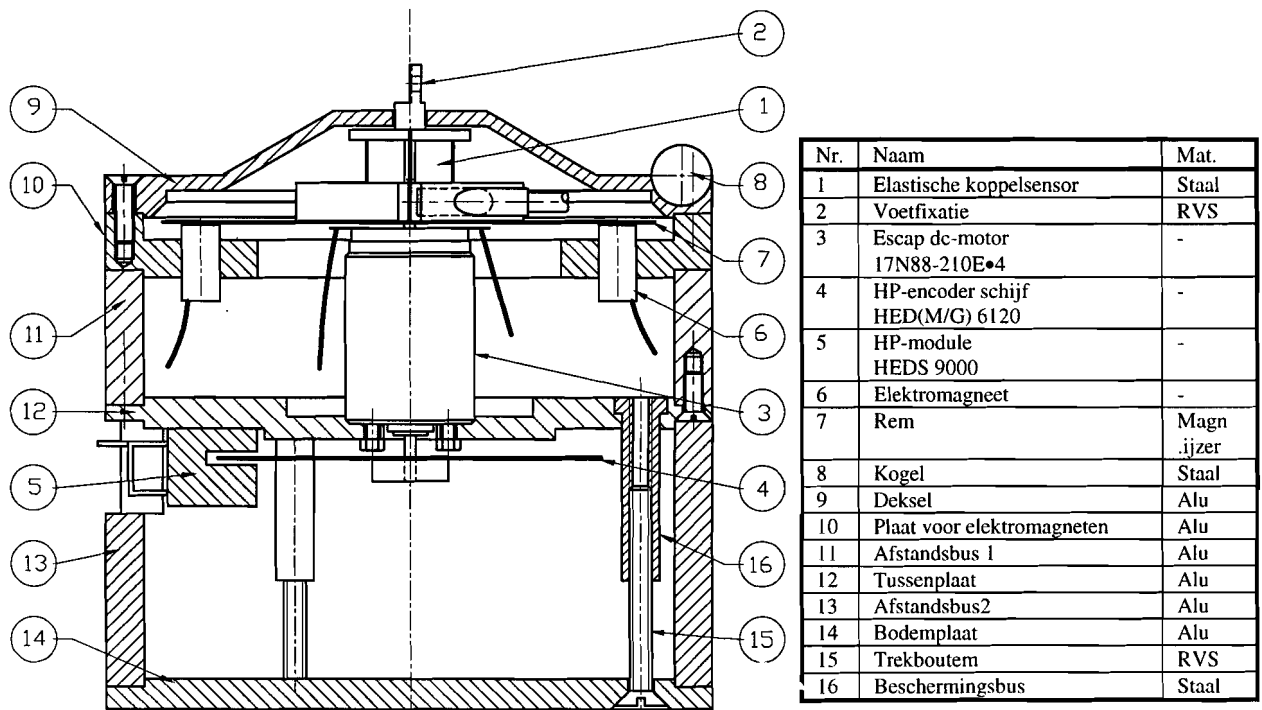
		Statisch koppel		Dynamisch koppel	
		Statisch meten	Dynamisch meten	Statisch meten	Dynamisch meten
Koppelsensoren	TSF	< 1	2-4	3-4	5-8
	Eigen ontwerp	< 1	1-2	2-3	3-5
Mechatronische ontwerpen	Lage resolutie	>10	<1	> 10	1-2
	Hoge resolutie	1-2	<1	2-3	2-3

De lage resolutie servosystemen zijn vanwege de hoge meetnauwkeurigheid bij constante voethoek ongeschikt voor statische metingen. Er is gekozen om de statische metingen met de elastische koppelsensoren te verrichten. De sensoren hebben dan de grootste nauwkeurigheid en er bestaat de mogelijkheid om de voethoek tijdens de koppelmeting stijf vast te leggen, op een andere manier dan met het servosysteem. Omdat er een zo groot mogelijke meetnauwkeurigheid gewenst is, is aan de hand van de nauwkeurigheidsbeschouwing in hoofdstuk 2 aan het eigen ontwerp de voorkeur gegeven.

Voor het totaalontwerp wordt dus gebruik gemaakt van vier meetunits. De twee meetunits voor de statische metingen zullen de statometers worden genoemd, de twee meetunits voor de dynamische metingen zullen de dynamometers worden genoemd. De meetunits zijn uitwisselbaar in het totaalontwerp. Door de meetunits van dezelfde afmetingen te maken zijn ze allen op dezelfde manier in het totaalontwerp te plaatsen.

5.1.1 Het ontwerp van de statometers

In de vorige paragraaf is aangegeven dat, vanwege de eis van uitsluitend statische metingen, de voethoek tijdens de koppelmeting op een andere manier vastgelegd kan worden dan met het servosysteem. In figuur 5.1 is aangegeven op welke manier dit gerealiseerd is. De tekening vertegenwoordigt beide statometers. Er zijn twee statometers; de statometer voor isometrische meting aan de scheenspier heeft een elastische koppelsensor met een bereik van 4 mNm, de statometer voor isometrische meting aan de kuitspier heeft een elastische koppelsensor met een bereik van 20 mNm.



Figuur 5.1 De statometer, schaal 1:1

Werking

De elastische koppelsensor (1), uitvoerig behandeld in hoofdstuk 2, wordt gepositioneerd door een servomotor (3). Deze gelijkstroommotor is van het merk Escap (type 17N88-210E•4). Aan de koppelsensor zit de mogelijkheid voor bevestiging van de voetfixatie (2), welke beschreven is in hoofdstuk 4. De hoekinformatie wordt geleverd door een encoder van Hewlett-Packard (4 en 5). Wanneer de hoek voor de statische meting is bereikt wordt deze gefixeerd door vier elektromagneten (6), die in een aluminium plaat (10) gelijmd zijn. De magneten oefenen dan een aantrekkingskracht uit op een axiaal slap ijzeren plaatje (7), dat aan de basisschijf van de koppelsensor gelijmd is. De normaalkracht veroorzaakt een wrijvingskracht die de rotatie van de koppelsensor tegengaat.

De positionering van de meetunits in het totaalontwerp is mogelijk met behulp van drie stalen kogels (8) onder een hoek van 120° met elkaar, die in het deksel van het huis (9) zijn aangebracht. De drie kogels passen in drie V-vormige groeven van het totaalontwerp (Constructieprincipes). De constructie van de drie kogels in de drie V-groeven is gemaakt ten behoeve van de reproduceerbaarheid van de hoek en positie van de voetfixatie ten opzichte van de staartfixatie.

Het huis

Het huis is geheel van aluminium. De plaat waarin de magneten zitten (10) is aan een bus (11) gelijmd waarbinnen zich de motor bevindt. Onder tegen de bus is een tussenplaat (12) gebout waarop de motor en de encodermodule zijn gemonteerd. Deze encodermodule wordt uitgelijnd met twee 'uitlijnpennen' zoals dat beschreven is bij ontwerp 2 in hoofdstuk 3. De ruimte waarin de motor, de koppelsensor en de magneten zich bevinden wordt afgesloten door het deksel met de drie kogels (9) op de plaat (10) te bouten. Tegen de tussenplaat is een verlengingsbus (13) getrokken om dezelfde afmetingen als de dynamometers te verkrijgen. Dit is gedaan door een bodemplaat (14) met behulp van een bout (15) naar de tussenplaat te trekken. Om beschadiging van de encoder te voorkomen is de bout in een stalen bus met schroefdraad (16) gedraaid, en deze bus is met een kraag in de tussenplaat gelijmd.

5.1.2 Het ontwerp van de dynamometers

De dynamometers zijn uitgebreid besproken in hoofdstuk 3. Tekeningen van de beide constructies inclusief aanpassingen voor toepassing in het totaalontwerp zijn gegeven in bijlage 11, 'De tekeningen van de meetunits'.

5.2 De integratie van de verschillende componenten in het meetinstrument

Het totaalontwerp van het meetinstrument is weergegeven in figuur 5.2 tot 5.4.

In dit ontwerp zijn de volgende reeds behandelde componenten te onderscheiden:

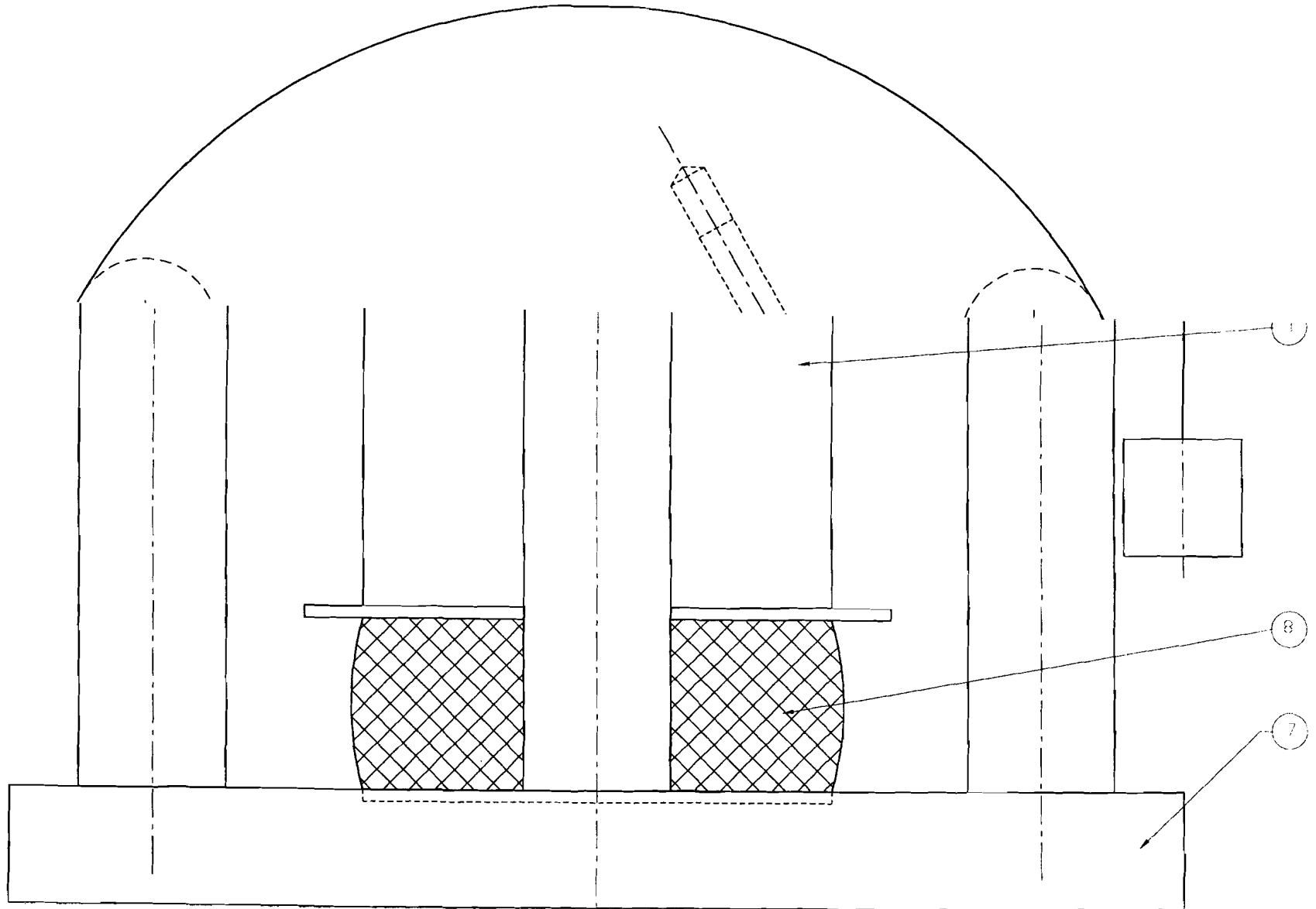
- De meetunit (1), hoofdstuk 2, 3 en 5
- De staartfixatie (2), hoofdstuk 4
- De voetfixatie (3), hoofdstuk 4
- Het gegoten blokje om het voetje (4), hoofdstuk 4
- De kniegeleiding (5), hoofdstuk 4

In onderstaande paragrafen zal het totaalontwerp verder worden toegelicht.

5.2.1 De positionering van de meetunit

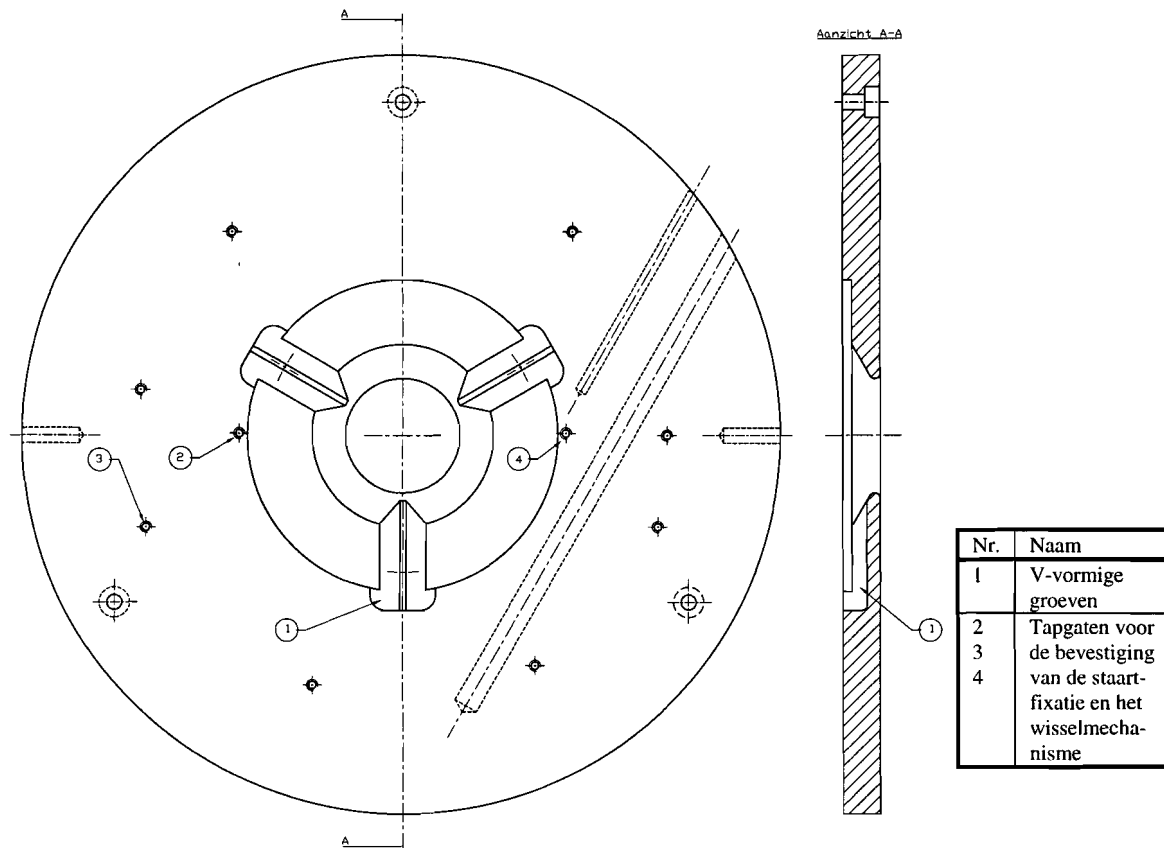
De meetunit wordt bevestigd tussen het meetplateau (6) en de grondplaat (7). Hiervoor zijn drie groeven in de onderkant van het meetplateau aangebracht waar de drie kogels van de meetunits in passen (zie figuur 5.3, nr. 1). De voorspankracht op de kogels wordt aangebracht door een component (8) dat bestaat uit een laag schuimrubber dat tussen twee roestvrij stalen plaatjes gelijmd is. Door het schuimrubber component ingedrukt onder de meetunit te plaatsen wordt de voorspankracht aangebracht en is de meetunit in het instrument gepositioneerd. De positie van het voorspanelement wordt bepaald door een gefreesd profiel in de grondplaat (figuur 5.4).

Boven-reanzicht

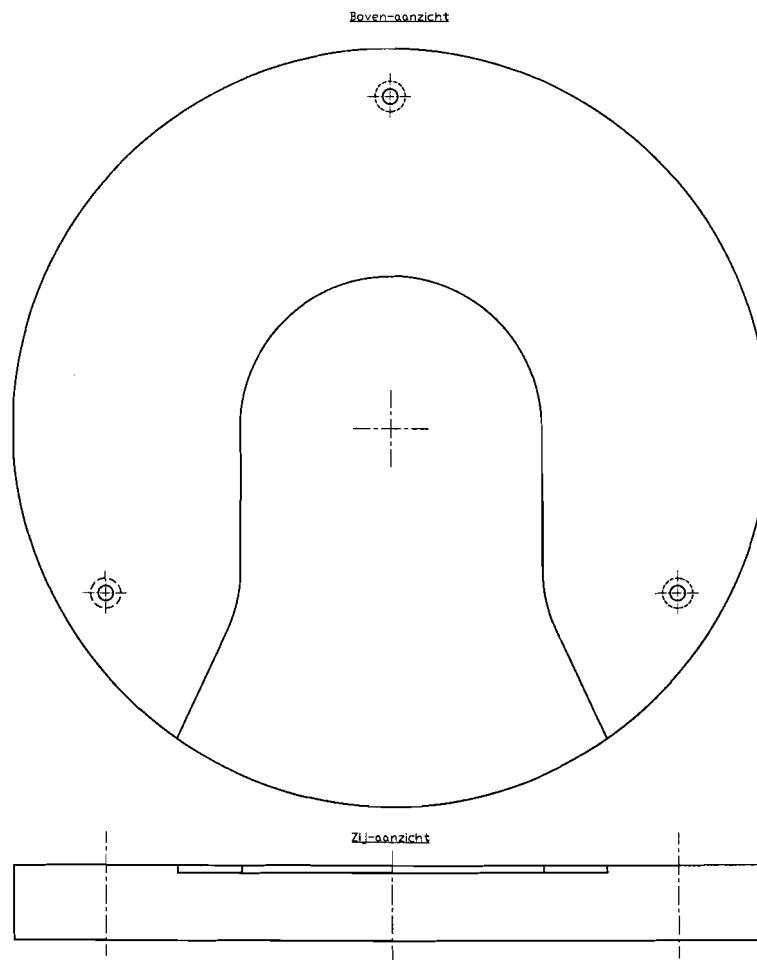


Figuur 5.2

Het totaalontwerp, schaal 1:1

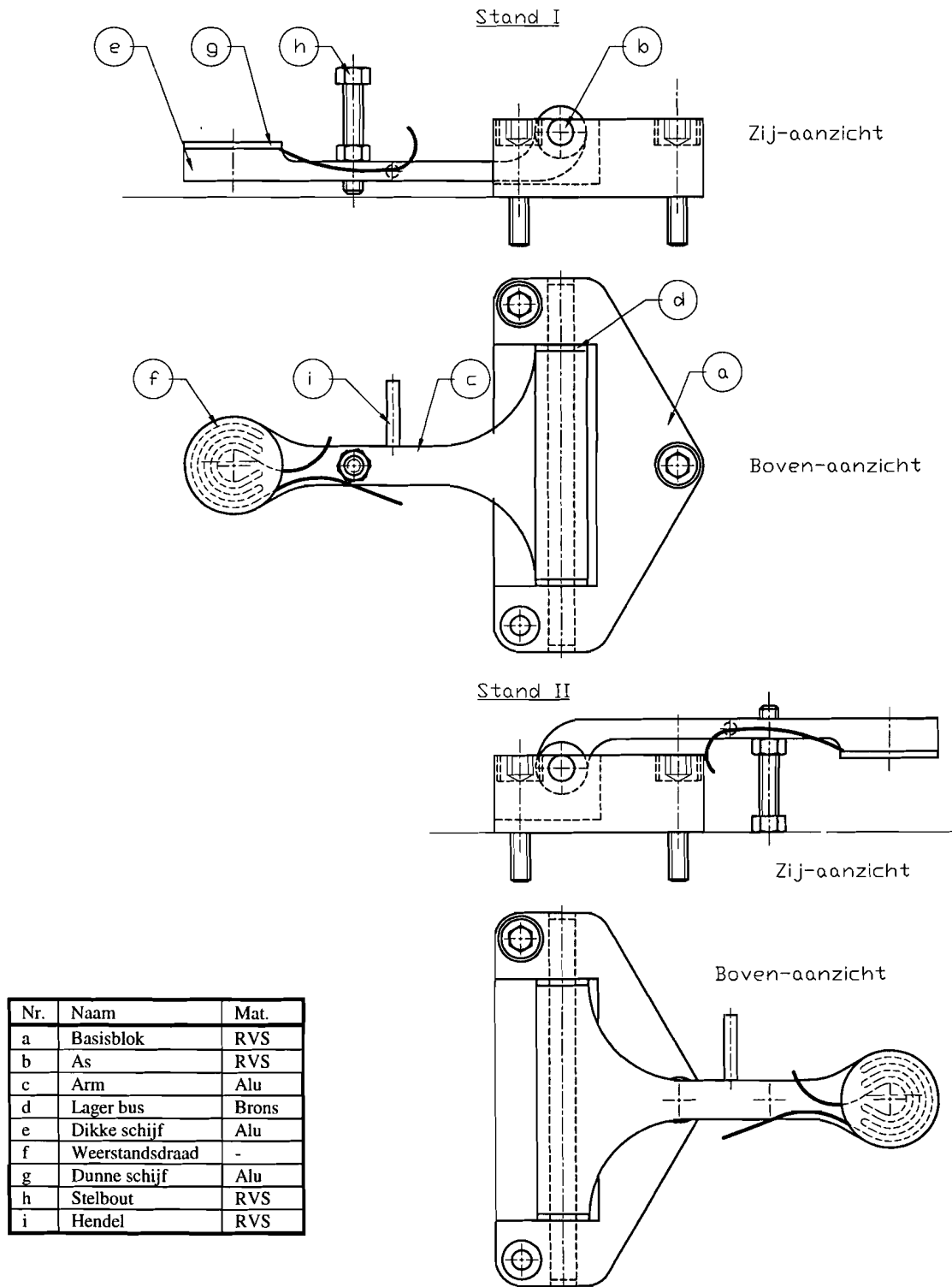


Figuur 5.3 Bovenaanzicht en dwarsdoorsnede van het meetplateau, schaal 1 : 2



Figuur 5.4 Bovenaanzicht en zij-aanzicht van de grondplaat, schaal 1 : 2

5.2.2 Het wisselmechanisme voor de muizevoet



Figuur 5.5 Het wisselmechanisme, schaal 1 : 1

Voorafgaand aan de dynamische metingen zal vaak een statische meting worden uitgevoerd om de voethoek te bepalen bij maximaal spierkoppel. De muis ligt tijdens die statische metingen volledig geprepareerd op het meetplateau. De elektroden die gebruikt worden voor de stimulatie van de spier zijn dan zodanig aangebracht in

de muis, dat zij de juiste spier optimaal kunnen aanslaan. Dit prepareren is een tijdrovende en nauwkeurige bezigheid. Tijdens het wisselen van de meetunits is het belangrijk dat de elektroden voor de stimulatie deze optimale positie behouden. Om tijdens het wisselen van de meetunits de muizevoet gedefinieerd vast te houden is een mechanisme ontworpen dat weergegeven is in zowel de tekeningen van het totaalontwerp (9) als in figuur 5.5.

Beschrijving

Het mechanisme bestaat uit een blok (a) met een as (b), waar omheen een aluminium arm (c) gelagerd in een bronzen bus (d) kan roteren. Aan het uiteinde heeft de arm de vorm van een dikke ronde schijf (e). In deze schijf zijn groeven aangebracht waarin weerstandsdraad (f) is aangebracht. Deze weerstandsdraad is aangesloten op een tijdschakelaar en kan gedurende een gedefinieerde tijd spanning over de draad kan zetten. De weerstandsdraad is met warmtegeleidende pasta opgesloten door een dunnere aluminium schijf (g). Bij verhitting door de weerstandsdraad zal de dunne schijf door zijn kleine volume en hoge warmtegeleidingscoëfficiënt snel warm worden. Bij het wegvallen van de spanning over de weerstandsdraad zal de warmte zich over de hele arm kunnen verspreiden, en er zal een relatief snelle afkoeling plaatsvinden. Het mechanisme wordt gepositioneerd met twee M3-bouten in de reeds aanwezige getapte gaten (figuur 5.3, nr. 2 en 3) van het meetplateau.

De arm heeft twee functionele standen (stand I en stand II). Deze standen zijn te wijzigen met behulp van een stelbout (h). Om de arm van stand I in stand II te brengen is een hendel aangebracht (i).

Werkwijze

Het mechanisme maakt gebruik van een lijm met de commerciële naam 'hot-melt'. Bij hoge temperatuur ($\pm 65^{\circ}\text{C}$) is deze lijm vloeibaar en heeft hechtende eigenschappen. Bij kamertemperatuur is het een niet plakkende vaste stof.

De lijm wordt op het mechanisme aangebracht in stand I, door een zeer kleine hoeveelheid hot-melt op het plateau van schijf (g) te leggen. Wanneer er een stroom door de weerstandsdraden vloeit, wordt het plateau verhit en de lijm smelt. De vloeibare hot-melt kan zich verdelen over het plateau. Deze verdeling is eventueel handmatig te beïnvloeden. Na de verdeling wordt de verhitting gestopt en de hot-melt stolt. De arm kan met behulp van de hendel in stand II worden gebracht. Het plateau ligt nu boven op het gegoten blokje van de voet. Bij een korte verhitting zal de lijm even vloeibaar worden. Dit is voldoende om de voet aan het plateau te laten hechten. Vervolgens kan de meetunit verwisseld worden. Bij opnieuw verhitten van het plateau wordt de lijm weer vloeibaar en de arm kan van het voetje getild worden. Het lijmplateau kan tenslotte gereinigd worden.

5.2.3 De beheersing van de lichaamstemperatuur van de muis

Tijdens de experimenten mag de muis niet onderkoeld raken. Om te voorkomen dat er teveel warmte aan de muis onttrokken wordt is het meetplateau op een temperatuur van 40°C gebracht. Dit is verwezenlijkt door het meetplateau te voorzien van een temperatuur-regeling. Hiervoor is er een verwarmingsstaaf (10) en een thermokoppel (11) in het plateau aangebracht. Door de relatief grote temperatuur geleidingscoëfficiënt van aluminium ten opzichte van andere materialen zijn de temperatuursgradiënten in het plateau tot een minimum beperkt. Om een zo groot mogelijke warmtecapaciteit van het meetplateau te bereiken, is de dikte van het plateau zo groot mogelijk gekozen. Een grote warmtecapaciteit is gunstig voor de regeling om een zo constant mogelijke temperatuur te bereiken. Tenslotte is het plateau aan de onderkant geïsoleerd met een plaat Teflon (12) om het verlies van warmte zoveel mogelijk tegen te gaan en zo het benodigde vermogen tot een minimum te beperken. Tevens heeft dit een positief effect op de temperatuursgradiënt in het plateau.

In de opstelling van prototype 2 van de staartfixatie, zoals die besproken is in hoofdstuk 4, is een dergelijke temperatuurregeling getest. Het meetplateau in deze opstelling was niet geïsoleerd en had een dikte van 8 mm. De zijden van het vierkante plateau waren 200 mm. Verder had het plateau een boonvormig gat in het midden met afmetingen van ongeveer 20×40 mm. De maximaal gemeten temperatuursgradiënt bedroeg $\pm 1^{\circ}\text{C}$ wat alleszins acceptabel is voor een goede beheersing van de lichaamstemperatuur van de muis.

Met een soortgelijke regeling is ook geëxperimenteerd in een prototype van de staartfixatie voor ratten. Ook hier voldeed de regeling. Tekeningen van beide meetplateaus en berekeningen van het benodigd vermogen zijn weergegeven in bijlage 12, 'De berekening van de warmteoverdracht van het meetplateau'.

5.2.4 Het meten van beide muizevoeten

In de tekeningen van het totaalontwerp is de situatie weergegeven dat de linkervoet van de muis gemeten wordt. Omdat de twee wielen uit de staartfixatie genomen kunnen worden kan de staartfixatie ook andersom gebruikt worden. De staartfixatie moet dan bevestigd worden met behulp van de tapgaten aan de andere zijde van het meetplateau (figuur 5.3, nr. 2 en 3). Ook het wisselmechanisme is zodanig ontworpen, dat deze in de tegenoverliggende getapte gaten (figuur 5.3, nr. 4) gemonteerd kan worden.

De voetfixatie voor linkervoeten kan niet gespiegeld gebruikt worden. Voor het meten van rechervoeten is een gespiegelde voetfixatie nodig.

6. Conclusies

In dit project zijn twee concepten van koppelmeter geanalyseerd, het elastisch concept en het mechatronisch concept. Er bestaat een principieel verschil tussen beide concepten. Bij de koppelsensoren vertaalt een hoekafwijking als gevolg van de sinusvormige beweging van de voet zich in een koppel. Dit heeft als gevolg dat statische metingen nauwkeuriger zijn dan dynamische metingen. Bij het mechatronische concept is deze beïnvloeding van de hoeknauwkeurigheid door de voetbeweging op de nauwkeurigheid van het spierkoppel niet aanwezig. Door de beperkte resolutie van de encoder is er echter bij statische metingen sprake van Digital Jitter, waardoor de meetnauwkeurigheid negatief wordt beïnvloed. Bij het lage resolutie servosysteem is dit effect het sterkst, maar door de hoge bandbreedte levert dit systeem dynamisch een zeer hoge meetnauwkeurigheid.

De meting van het spierkoppel

- Er is gekozen om de koppelsensoren van het eigen ontwerp met een meetbereik van 4 en 20 mNm uit te werken voor statische metingen, en voor dynamische metingen beide types van het lage resolutie servosysteem met een meetbereik van 8 en 40 mNm. Deze keuze is gemaakt op grond van de grootste haalbare nauwkeurigheid onder alle omstandigheden. Dit meetbereik is voldoende groot om de spierkoppels van de kuit- en de scheenspier bij verschillende belastingen te meten.
- Onder bijna alle omstandigheden (spierkoppel < 30 Hz) kan een meetnauwkeurigheid van beter dan 2% gehaald worden. Bij een sterk dynamisch koppel (30 ~ 50 Hz) kan een meetnauwkeurigheid van beter dan 5% gehaald worden bij een statische meting aan de scheenspier, en beter dan 3% bij een statische meting aan de kuitspier. Bij dynamische metingen wordt een sterk dynamisch koppel gemeten met een onnauwkeurigheid van beter dan 2%.

De voethoek

- Onder alle omstandigheden is de hoeknauwkeurigheid van de voet kleiner dan 1° waarmee aan de eis voldaan is.
- Naast sinusvormige bewegingen met een frequentie van maximaal 8.5 Hz zijn door het servosysteem eventueel ook andere bewegingen te realiseren en zijn ook hogere frequenties haalbaar. Het bereik van deze bewegingen is ruim voldoende groot om de muis een fysiologische belasting op te leggen.

Chronische experimenten

- Met de staartfixatie en de voetfixatie is een constructie ontworpen waarbij de chirurgische ingrepen bij de muis ten behoeve van de fixatie afwezig zijn. Dit maakt chronische experimenten mogelijk.
- Er moet echter nog een manier worden gevonden om het gegoten blokje van het voetje af te krijgen. Hierbij moet gedacht worden aan een mechanische verwijdering of aan een ander gietmateriaal.

Referenties

J.A. Ashton-Miller, Y. He, V.A. Kadhiresan, D.A. McCubbrey, J.A. Faulkner, An apparatus to measure in vivo biomechanical behaviour of dorsi- and plantarflexors of mouse ankle, *Journal of Applied Physiology* 1992, **72**(3), 1205-1211

E. van Breda, *The effect of testosterone on skeletal muscle energy metabolism in diabetic and non-diabetic endurance trained rats*, proefschrift p.17, 1994

S.V. Brooks, J.A. Faulkner, D.A. McCubbrey, Power outputs of slow and fast skeletal muscles of mice, *Journal of Applied Physiology* 1990, **68**(3), 1282-1285

A. de Haan, J.C.M. Koudijs, R.A. Wevers, B. Wieringa, The effects of MM-Creatine Kinase deficiency on sustained force production of mouse fast skeletal muscle, *Experimental Physiology* 1995, **80**, 491-494

A.F. Huxley, R. Niedergerke, Structural changes in muscle during contraction, *Nature* 1954, **173**, 971

R.S. James, J. D. Altringham, D.F. Goldspink, The mechanical properties of fast and slow skeletal muscles of the mouse in relation to their locomotory function, *Journal of Experimental Biology* 1995, **198**, 491-502

D.A. Lowe, G.L. Warren, C.P. Ingalls, D.B. Boorstein, R.B. Armstrong, Muscle function and protein metabolism after initiation of eccentric contraction-induced injury, *Journal of Applied Physiology* 1995, **79**(4), 1260-1270

S. Nicolopoulos-Stournaras, J.F. Iles, Hindlimb muscle activity during locomotion in the rat (*Rattus norvegicus*) (Rodentia: Muridae), *Journal of the Zoological Society of London* 1984, **203**, 427-440

Zi-Ping Fang, J.T. Mortimer, A method to effect physiological recruitment order in electrically activated muscle, *Transactions on biomedical engineering* 1991, **38**(2), 175-179

W.D. McArdle, F.I. Katch, V.L. Katch, *Exercise physiology, Energy, Nutrition, and Human Performance*, 3e druk 1991, London, LEA & FEBIGER

A.C. Guyton, *Textbook of medical physiology*, 7e druk 1984, London, W.B. Saunders Company

D.A. Jones, J.M. Round, *Skeletal Muscle in health and disease, A textbook of muscle physiology*, 3e druk 1993, Manchester, Manchester University Press

P. Popesko, V. Rajtová, J. Horák, *A colour atlas of Anatomy of small laboratory animals, volume two: rat-mouse-hamster*, 1992, Bratislava, Wolfe Publishing Ltd

E. Dekkers, Instrumenten met een duikspool als actuator of krachtopnemer, *Mikroniek nummer 5*, 1995

M.G.M. Lammers, Lineaire servomotoren: technologie en toepassingen, *de constructeur nummer 1 en 2*, 1994

W.S. Janna, *Engineering Heat Transfer, SI Edition*, 1986, Hong-Kong, Van Nostrand Reinhold (International)

M. Hesselink, *persoonlijke communicatie*, 1996

P.C.J.N. Rosielle, *persoonlijke communicatie*, 1996

E. Dekkers, *persoonlijke communicatie*, 1996

M. Geusen, *De relatie tussen hoeksnelheid van het enkelgewricht en de vezelreksnelheid van de Tibialis Anterior van een rat*, Stageverslag nr. 96-018 Werktuigkundige Medische Technologie, 1996

Collegedictaten Technische Universiteit Eindhoven:

Constructieprincipes, nr. 4007, 1996

Dynamisch gedrag van constructies en mechanismen, nr. 4627, 1987

Het ontwerpen van elektro-mechanische servosystemen, nr. 4632, 1988

Werktuigkundige Meettechniek, nr. 4629

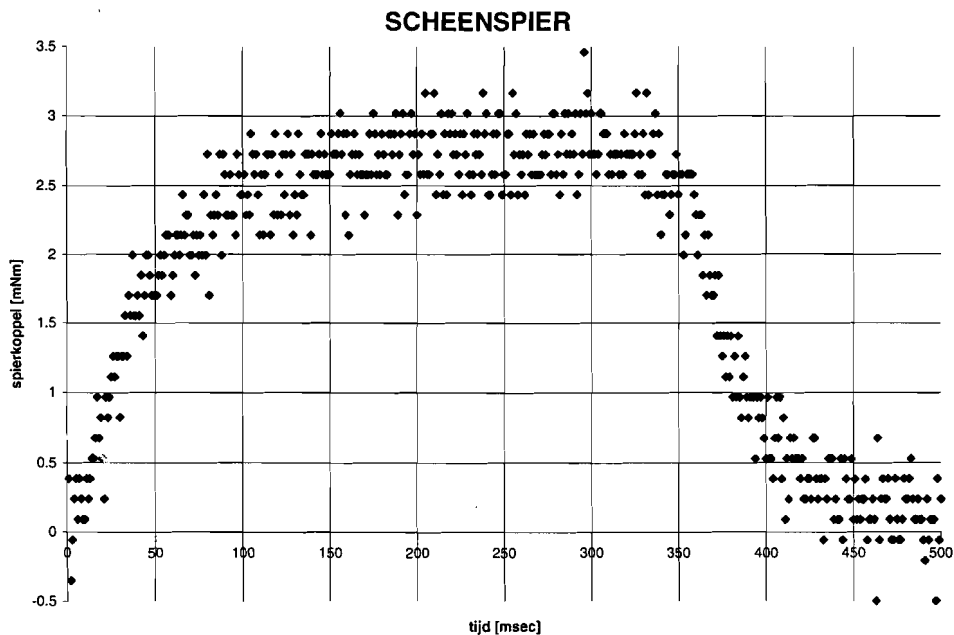
Werktuigkundige Regeltechniek I, nr 4592, 1991

Besturingstechnologie, nr. 4603, 1993

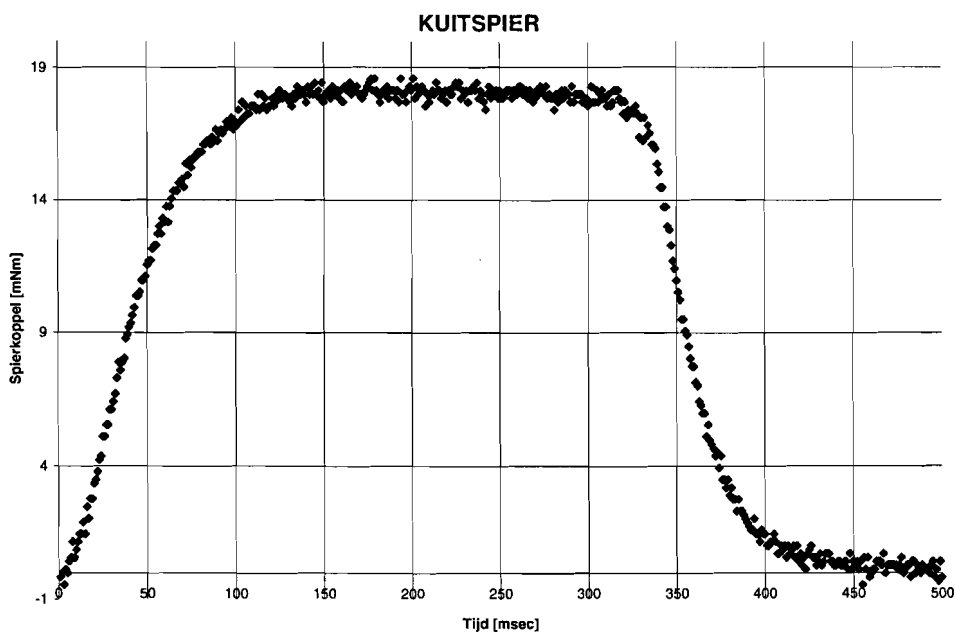
Inleiding tot de Elektrische Aandrijftechniek, nr. 5723, 1989

B1 De muisexperimenten

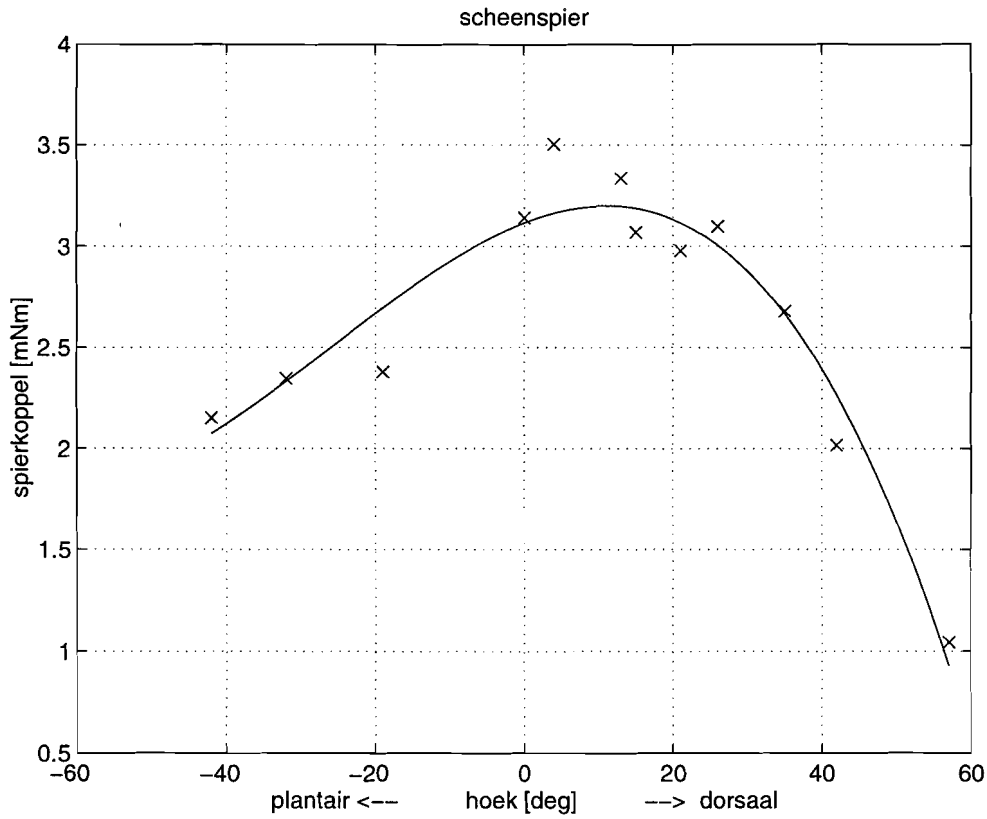
Met de opstelling zoals die beschreven is in paragraaf 4.5.2, 'Prototype 2', zijn verschillende metingen verricht van het spierkoppel van de kuit- en de scheenspier. In figuur B1.1 en B1.2 zijn twee grafieken afgebeeld waarin het spierkoppel van één contractie als functie van de tijd gegeven is. Elk puntje in de grafiek stelt één scan voor. In figuur B1.3 en B1.4 zijn de maximaal gemeten spierkoppels afgebeeld als functie van de spierlengte.



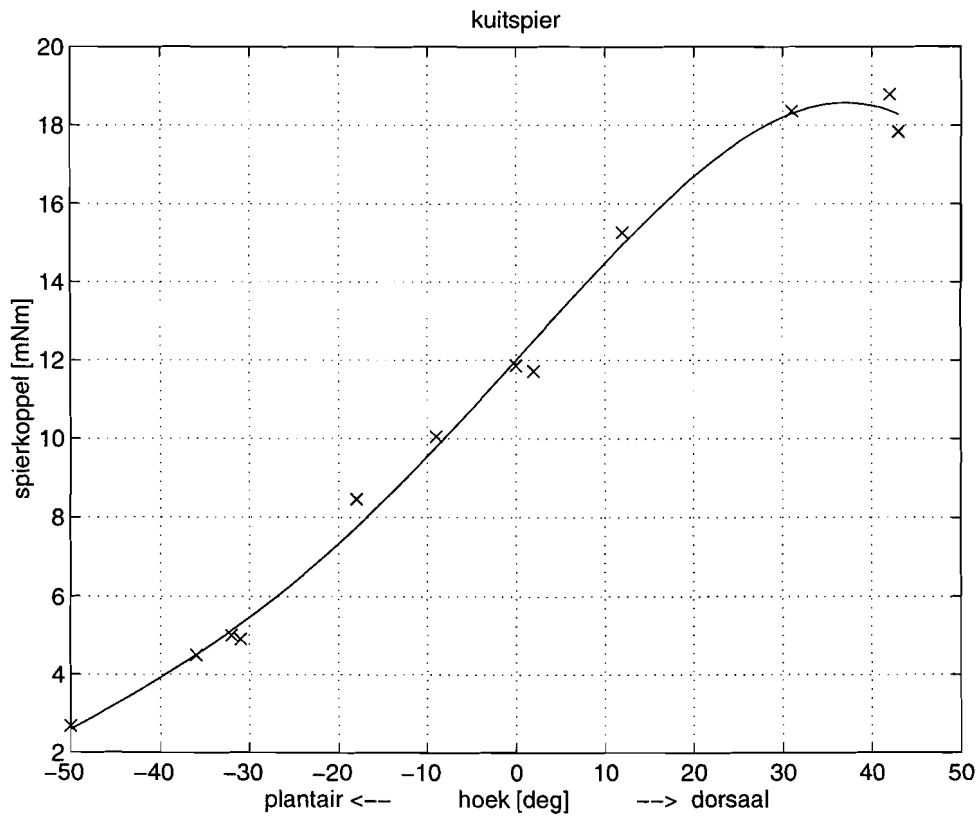
Figuur B1.1 Het spierkoppel als functie van de tijd
 Voethoek (rechte hoek tussen scheenbeen en voet = 0°) : $\pm 15^\circ$ dorsaal
 (Plantair = richting de zool van de voet; Dorsaal = richting de rug van de voet)
 Stimulatie spanning : 3 Volt
 Stimulatie frequentie : 200 Hz



Figuur B1.2 Het spierkoppel als functie van de tijd
 Voethoek : $\pm 40^\circ$ dorsaal
 Stimulatie spanning : 2.5 Volt
 Stimulatie frequentie : 150 Hz



Figuur B1.3 Het maximale spierkoppel als functie van de voethoek bij de scheenspier



Figuur B1.4 Het maximale spierkoppel als functie van de voethoek bij de kuitspier

B2 Specificaties van de koppelsensoren en van de inductieve sensoren

Beschrijving van de TSF koppelsensoren

Type	Bereik [mNm]	Diameter Uitgaande as [mm]	Eigen-frequentie [Hz]	Stijfheid* [Nm/rad]	Massa-traagheid* [kg·m ²]
TSF-000	0.1	1	60	$5.7 \cdot 10^{-3}$	$4.0 \cdot 10^{-8}$
TSF-005	0.5	1	100*	$2.9 \cdot 10^{-2}$	$7.4 \cdot 10^{-8}$
TSF-01	1	1.5	200**	$5.7 \cdot 10^{-2}$	$3.6 \cdot 10^{-8}$
TSF-05	5	1.5	300**	$2.9 \cdot 10^{-1}$	$8.2 \cdot 10^{-8}$
TSF-1	10	2	400*	$5.7 \cdot 10^{-1}$	$9.0 \cdot 10^{-8}$
TSF-5	20	3	500	1.1	$1.1 \cdot 10^{-7}$

* Deze waarden zijn niet door de fabrikant opgegeven en zijn voortgekomen uit eigen berekeningen en afschattingen.

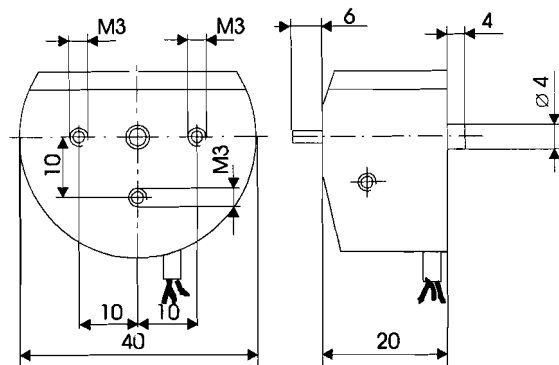
** Deze waarden zijn afschattingen van de fabrikant.

Meetprincipe:

De sensor is samengesteld uit een as gemonteerd op een kruisveerscharnier. Er is dus sprake van wrijvingsloze metingen. De hoekmeting van de as geschiedt met behulp van een lineaire verplaatsingsopnemer.

Belangrijkste karakteristieken:

- max. overbelasting : 20 - 50%
- niet-lineariteit : 1 %
- hysteresis : 0.5 %
- asymmetrie koppel : max. 5 %
- resolutie : < 0.1 %



Fabrikant :

CSEM Instruments: Centre Suisse d'Electronic et de Microtechnique SA
Jaquet-Droz 1, CH-2007 Neuchâtel, Zwitserland

Beschrijving van de inductieve sensoren

Inductieve sensor type HA-30S

Elektronica type IS-115-1

Specificaties

- Meetbereik : 0 ~ 0.4 mm
- Uitgangsspanning : 0 ~ 0.4 V
- Niet-lineariteit : ± 1 %
- Resolutie : 1 µm
- Frequentiebereik : 0 ~ 5 kHz
- Uitgangsimpedantie : 52 Ohm
- Temperatuurstabiliteit :
 - Elektronica : 0,06 µm/°C
 - Sensor : 0,12 µm/°C
- Omgevingstemperatuur :
 - Elektronica : 0 ~ 50 °C
 - Sensor : -10 ~ 60 °C
- Voeding : 12 ~ 30 Vdc, ≤ 50 mA

Fabrikant :	Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG Königbacher Strasse 15 D-8359 Ortenburg-Dorfbach W.-Germany
Leverancier :	Peekel Instruments B.V. Industrieweg 161 3044 AS Rotterdam tel : 010 4152722

B3 De optredende voetsnelheden en versnellingen

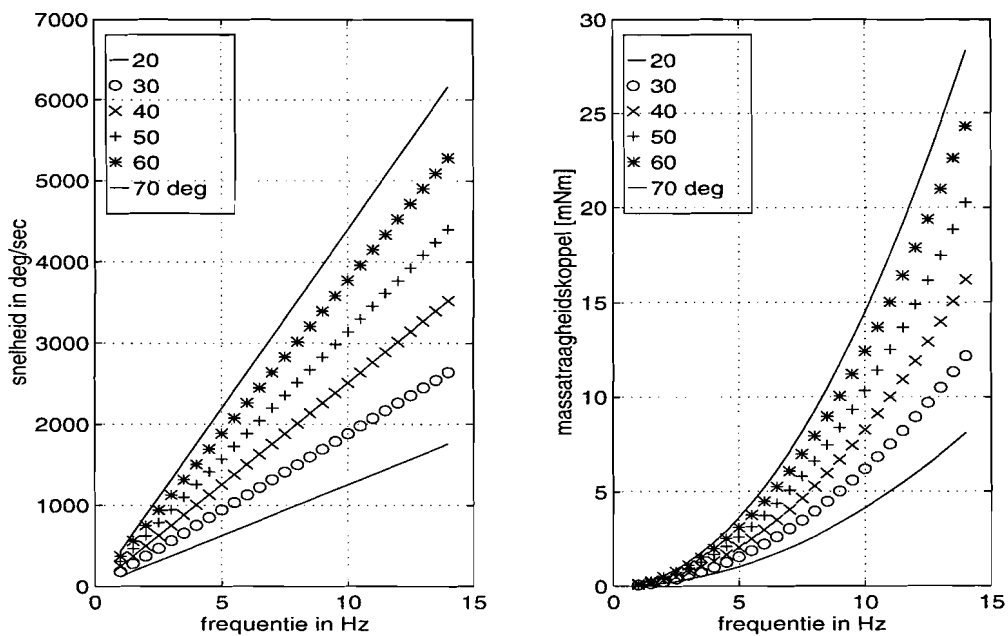
De muizenvoet moet een sinusvormige rotatiebeweging om de enkelas maken. Deze rotatie verloopt met een bepaalde amplitude en frequentie. Globaal gelden de volgende formules:

$$\phi = A \sin(2\pi ft) \quad (\text{B3.1})$$

$$\omega = \dot{\phi} = 2\pi f A \cos(2\pi ft) \quad (\text{B3.2})$$

$$\dot{\omega} = \ddot{\phi} = -4\pi^2 f^2 A \sin(2\pi ft) \quad (\text{B3.3})$$

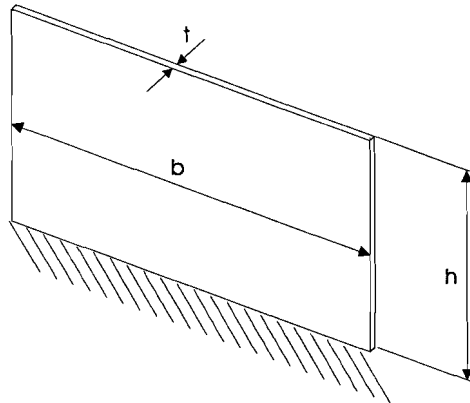
In de onderstaande figuur B3.1 zijn de maximaal optredende hoeksnelheden en hoekversnellingen als functie van de amplitude en frequentie uitgezet.



Figuur B3.1 Voetsnelheid en voetversnelling als functie van de bewegingsfrequentie bij verschillende amplitudes

B4 Analytische bladveerberekening

Berekening van de verhouding van stijfheden van een bladveer. De definitie van de bladveersymbolen is weergegeven in figuur B4.1:



Figuur B4.1 Bladveer symbolen

Stijfheid loodrecht op het vlak van een bladveer:

$$c_{\text{slap}} = \frac{Ebt^3}{h^3} \quad (\text{Constructieprincipes, 1995, p110}) \quad (\text{B4.1})$$

De axiale stijfheid van een bladveer wordt gegeven door een serieschakeling van de buigstijfheid en de afschuifstijfheid. De afschuifstijfheid wordt gegeven door de volgende formule :

$$c_a = \frac{5Gbt}{6h} \quad \text{met} \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)} \approx 0.385 \cdot E \quad (\text{Constructieprincipes, 1995, p48}) \quad (\text{B4.2})$$

De buigstijfheid wordt gegeven door de volgende formule :

$$c_b = \frac{3EI}{h^3} = \frac{Etb^3}{4h^3} \quad (\text{constructieprincipes, 1995, p46}) \quad (\text{B4.3})$$

De vervangende stijfheid voor de serieschakeling is:

$$c_{\text{stijf}} = \left(\frac{1}{c_a} + \frac{1}{c_b} \right)^{-1} = \frac{5GEb^3t}{20Gh^3 + 6Eb^2h} \quad (\text{B4.4})$$

Hieruit volgt:

$$\frac{c_{\text{stijf}}}{c_{\text{slap}}} = \frac{1.925 \cdot b^2 h^2}{t^2 (7.7 \cdot h^2 + 6 \cdot b^2)} \quad (\text{B4.5})$$

- Voor grote waarden van h geldt:

$$\left(\frac{c_{\text{stijf}}}{c_{\text{slap}}} \right)_{h \rightarrow \infty} = \frac{1.925 \cdot b^2}{7.7 \cdot t^2} \quad (\text{B4.6})$$

In deze vergelijking wordt c_{stijf} voornamelijk bepaald door de buigstijfheid.

- Voor kleine waarden van h geldt:

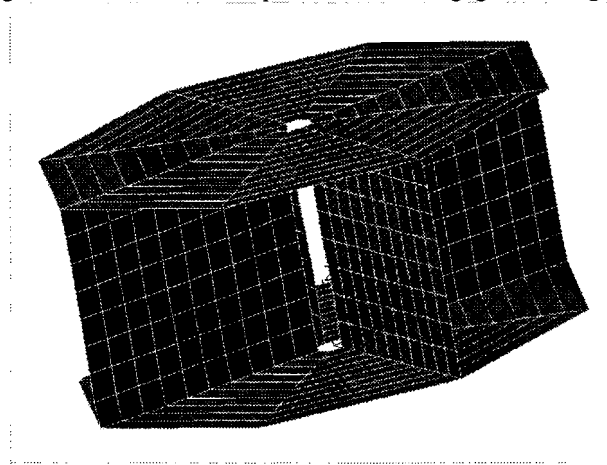
$$\left(\frac{c_{\text{stijf}}}{c_{\text{slap}}} \right)_{h \rightarrow 0} = \frac{1.925 \cdot h^2}{6 \cdot t^2} \quad (\text{B4.7})$$

In deze vergelijking wordt c_{stijf} voornamelijk bepaald door de afschuifstijfheid.

B5 ALGOR[®] berekeningen

Stijfheidsberekening

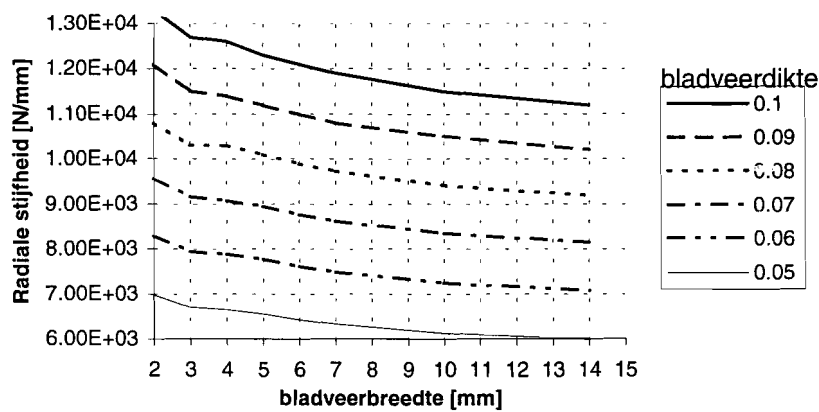
Om de stijfheden te berekenen van de koppelsensor van het eigen ontwerp in hoofdstuk 2 zijn er eindige elementen berekeningen uitgevoerd met ALGOR[®] op een model weergegeven in figuur B5.1.



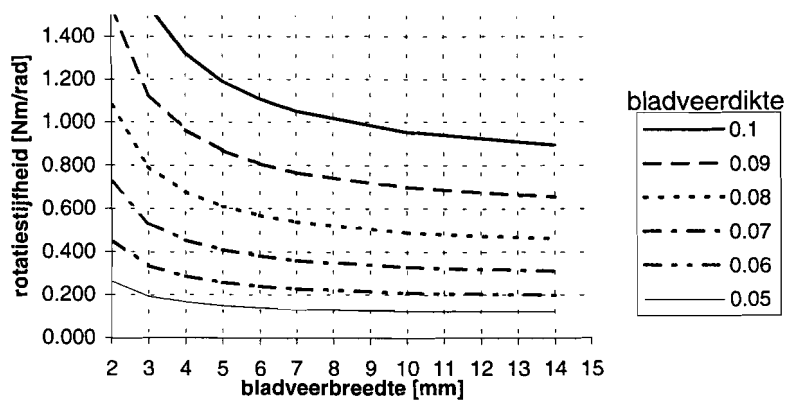
Figuur B5.1 ALGOR[®] model van de ontworpen koppelsensor

In deze figuur heeft de bovenste schijf een dikte van 1 mm en de onderste schijf een dikte van 5 mm. De verhouding van bladveerhoogte tot bladveerbreedte is 0.8. Het gat in het midden van de schijven heeft een diameter van 2 mm. De buitendiameter van de schijven is gevarieerd.

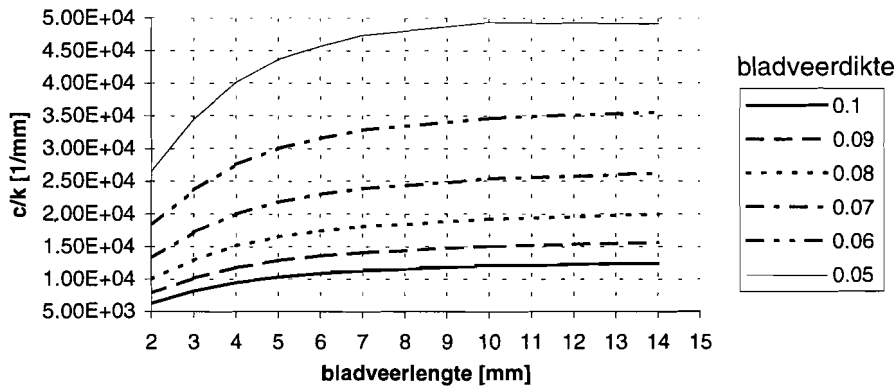
De resultaten zijn uitgezet in onderstaande grafieken.



Figuur B5.2 De radiale sensorstijfheid als functie van de bladveerbreedte



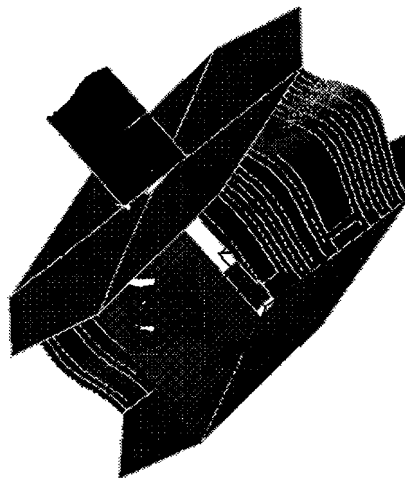
Figuur B5.3 De rotatiestijfheid als functie van de bladveerbreedte



Figuur B5.4 De verhouding radiale stijfheid tot rotatiestijfheid als functie van de bladveerlengte

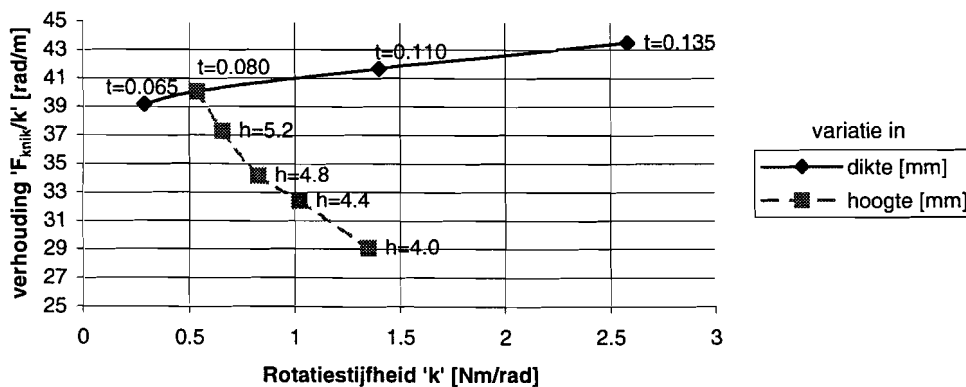
Knik

In de onderstaande figuur B5.5 is de knikvorm weergegeven van de gemodelleerde koppelsensor, bij een radiale kracht van 1 N, die op een hoogte van 40 mm boven de meetschijf is aangebracht. Dit is gedaan door radiaal een plaat loodrecht op de meetschijf te plaatsen. De kracht is vervolgens in het vlak van de plaat aangebracht. De basischijf is 5 mm dik, de meetschijf is 2 mm dik. Er is De diameter van beide schijven is gelijk aan 16 mm. De bladveren zijn 7 mm breed en 5.6 mm hoog. De dikte van de bladveren is gevarieerd van 65 tot 135 μm .



Figuur B5.5 De knikvorm van de gemodelleerde koppelsensor

In de onderstaande figuur B5.6 is de verhouding tussen de knikkracht en de rotatiestijfheid (F_{knik}/k) weergegeven als functie van de rotatiestijfheid.



Figuur B5.6 De verhouding tussen de knikkracht en de rotatiestijfheid als functie van de rotatiestijfheid. De rotatiestijfheid is gevarieerd met behulp van variatie in bladveerdikte en bladveerhoogte.

In de onderstaande tabel B5.1 is de knikkracht gegeven van de sensoren met de dimensies van de koppelsensoren zoals die in hoofdstuk 2 zijn bepaald.

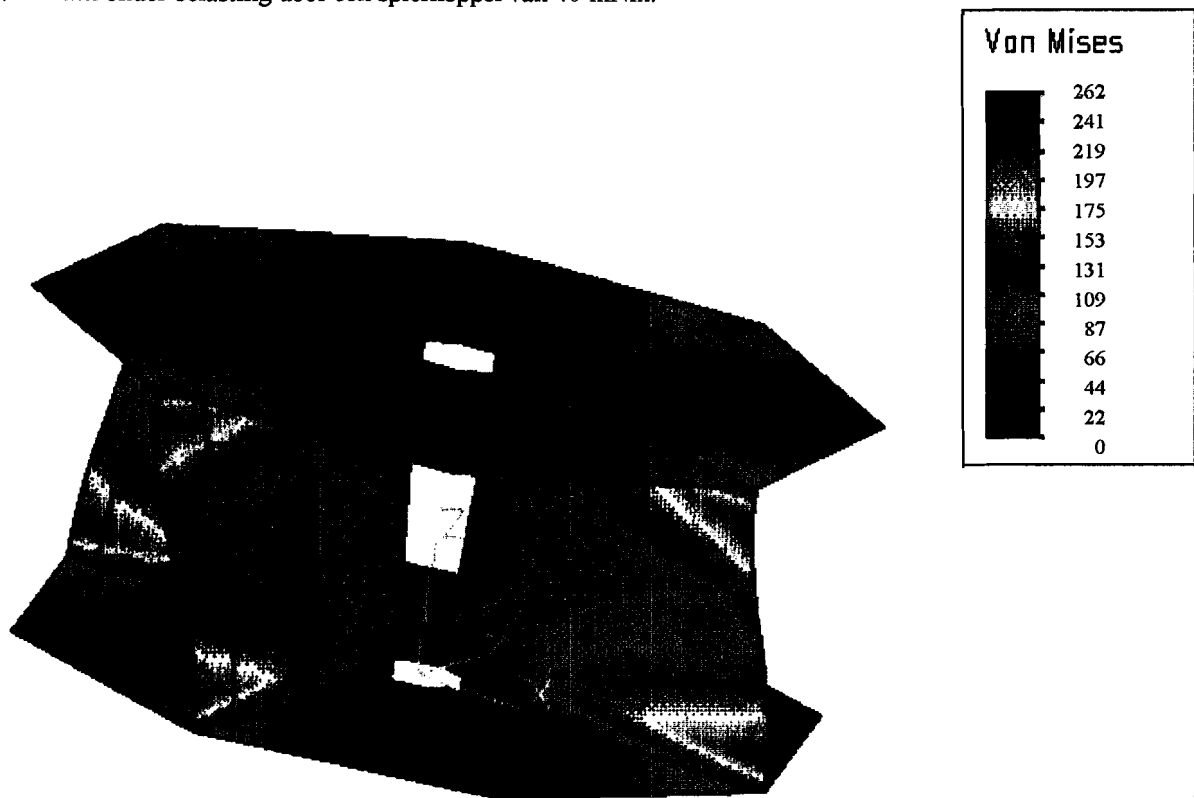
De maximaal optredende spanningen in de bladveren

In de onderstaande tabel B5.1 zijn de maximale spanningen in de bladveren van de koppelsensoren gegeven bij een belasting door een maximaal spierkoppel.

Tabel B5.1 De knikkrachten en maximale spanningen van de koppelsensoren met de definitieve dimensies

Bladveerdikte [mm]	Meetschijfdikte [mm]	Knikkracht [N]	Maximale Von Mises Spanningen [N/mm ²]
0.065	1.2	33	115
0.080	1.3	55	150
0.110	1.4	370	200
0.130	1.5	730	260

In figuur B5.7 is de spanningsverdeling te zien in de gemodelleerde koppelsensor met een bladveerdikte van 0.130 mm onder belasting door een spierkoppel van 40 mNm.



Figuur 5.7 De spanningsverdeling in de koppelsensor. In de legenda staan de Von Mises Spanningen in N/mm²

B6 De massatraagheidsberekening van de meetschijf

Berekeningen massatraagheid van de meetschijf:

Massatraagheid schijf zonder meetplaatjes:

Voor de massatraagheid en de massa van de schijf geldt:

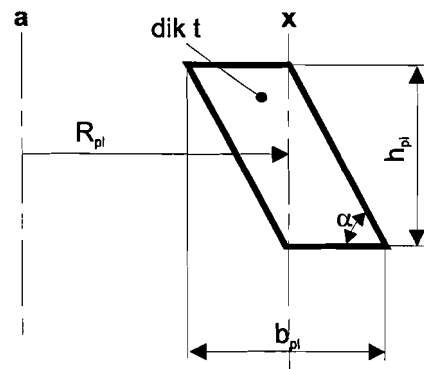
$$J_{\text{schijf}} = \frac{1}{2} m_{\text{sch}} R_{\text{sch}}^2$$

$$m = \rho A \cdot h_{\text{sch}} = \pi \rho R_{\text{sch}}^2 \cdot h_{\text{sch}}$$

Hieruit volgt:

$$J_{\text{schijf}} = \frac{\pi}{2} \rho h_{\text{sch}} R_{\text{sch}}^4$$

Massatraagheid meetplaatjes:



De massatraagheid van de meetplaatjes is berekend aan de hand van de geometrie zoals die is weergegeven in de figuur B8.1.

$$J_x = \frac{1}{12} m_{\text{pl}} b_{\text{pl}}^2$$

Verschuivingsstelling (van Steiner):

$$J_a = J_x + m_{\text{pl}} R_{\text{pl}}^2$$

De massa van het meetplaatje wordt gegeven door:

$$m_{\text{pl}} = \rho t (b_{\text{pl}} h_{\text{pl}} - h_{\text{pl}}^2 \cdot \tan(\pi - \alpha))$$

Figuur B8.1 Geometrie meetplaatje

De afmetingen in de constructie luiden:

h_{sch}	= 1 ~ 1.5 mm
R_{sch}	= 8 mm
ρ	= 7800 [kg/m ³]
α	= 55°
t	= 0.3 mm
h_{pl}	≈ 11 mm
b_{pl}	= 10 mm
R_{pl}	= 9 mm

Voor de totale massatraagheid geldt:

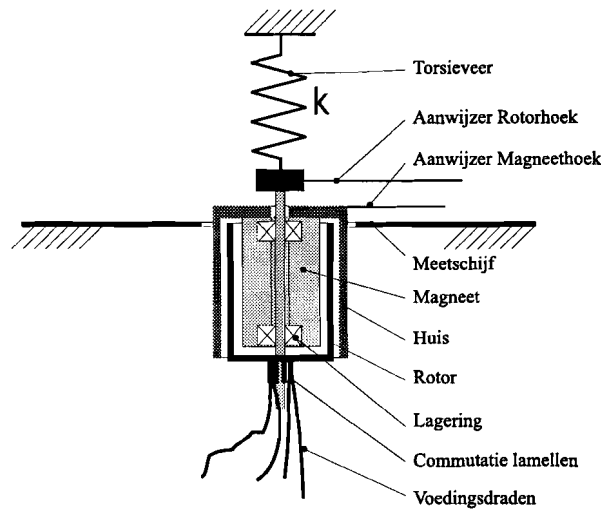
$$J_{\text{tot}} = 2 \cdot \rho t (b_{\text{pl}} h_{\text{pl}} - h_{\text{pl}}^2 \cdot \tan(\pi - \alpha)) + \frac{\pi}{2} \rho h_{\text{sch}} R_{\text{sch}}^4$$

B7 De motorexperimenten

Met verschillende gelijkstroommotoren met een ijzerloze kern zijn experimenten uitgevoerd ter bepaling van het motorkoppel van de verschillende fasen als functie van de rotorhoek. Met deze informatie is ook het onderlinge verschil in het geleverde koppel van iedere fase te bepalen.

Beschrijving van de opstelling

Van de opstelling van het experiment is schematisch een dwarsdoorsnede weergegeven in figuur B7.1.



Figuur B7.1 De opstelling ten behoeve van de motorexperimenten

Om de spoel van de motor op verschillende manieren te kunnen bekrachtigen zijn aan de lamellen van de commutatie draden gesoldeerd. Wanneer er een spanning over twee van die voedingsdraden wordt gezet gaat er een stroom door de spoel lopen. De rotor, met glijlagers gelagerd in de magneet, oefent dan een koppel uit op de magneet van de motor welke aan het huis bevestigd zit. De hoek die de magneet en het huis ten opzichte van de vaste wereld maken kan met behulp van een aanwijzer en een meetschijf uitgelezen worden. Deze magneethoek kan opgelegd worden door het huis met de hand te verdraaien en in een bepaalde stand vast te houden. Het motorkoppel als gevolg van een bekrachtiging van de spoel veroorzaakt afhankelijk van de stand van de magneet een hoekverdraaiing van de torsieveer. De rotorhoek is eveneens met behulp van een aanwijzer en de meetschijf te bepalen. Deze rotorhoek is een maat voor het koppel. De stand van de rotor in de motor kan bepaald worden uit het verschil tussen de magneethoek en de rotorhoek. Om de fouten bij de aflezing te minimaliseren zijn met behulp van een lamp midden boven de meetschijf schaduwen van de aanwijzers op de meetschijf aangebracht.

Bij de magneethoek waarbij de spoel een maximaal motorkoppel levert is de rotorhoek instabiel. Dit komt door het feit dat een grotere magneethoek resulteert in een lager motorkoppel dan het tegenkoppel geleverd door de torsieveer. De torsieveer veroorzaakt dan een verandering van de stand van de rotor naar een negatieve hoek van dezelfde waarde.

Als torsieveer is een koppelmeter van de firma Waters gebruikt. Deze heeft een rotatiestijfheid van $1.64 \cdot 10^{-3}$ Nm/rad. De meetschijf heeft een diameter van 200 mm en op de omtrek van deze schijf zijn 360 strepen aangebracht. Hierdoor is de resolutie van de aflezing van de hoek gelijk aan 1° .

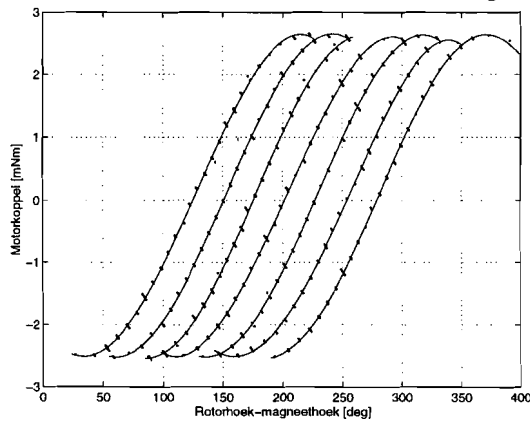
Er zijn twee motoren getest waarvan de gegevens zijn terug te vinden in de onderstaande tabel B7.1.

Tabel B7.1 Gegevens van de geteste gelijkstroommotoren (volgens fabrikant)

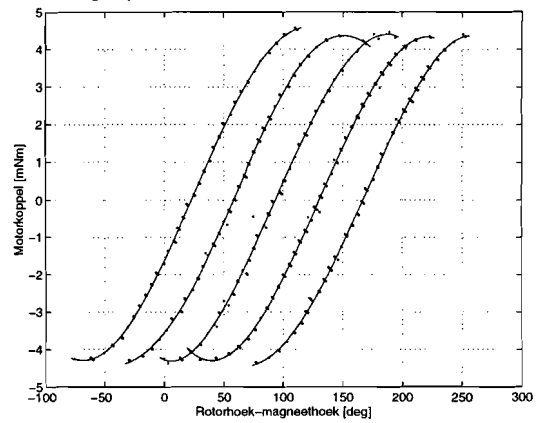
Motor type	Motorconstant e [mNm/A]	Startkoppel [mNm]	Maximaal continue koppel [mNm]	Aantal lamellen
Maxon 13Re032-11xxxxx	12.6	9.04	3.04	7
Escap 22C11-216E	9.5	10	4.25	5

Resultaten

In de onderstaande figuur B7.2 en B7.3 is het gemeten motorkoppel weergegeven van iedere motorfase als functie van de hoek tussen de rotor en de magneet. De gefitte lijn is een polynoom van de 5e orde.



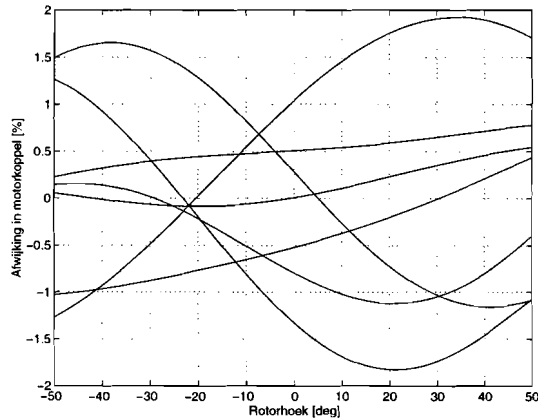
Figuur B7.2 MAXON 13Re032-11



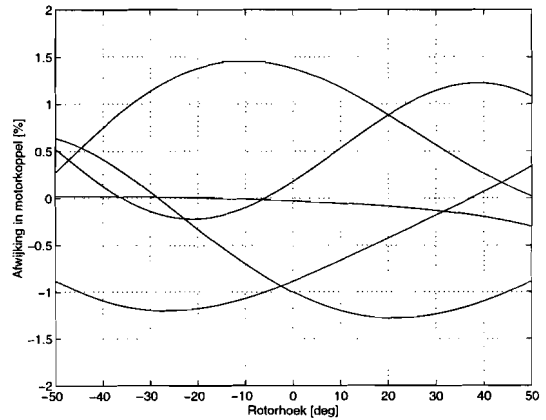
Figuur B7.3 ESCAP 22C11-216E

Het motorkoppel als functie van de rotorhoek ten opzichte van de magneet

Om de verschillen tussen de fasen te bepalen zijn de krommen zodanig verschoven dat ze over elkaar heen liggen. De afwijkingen van de verschillende fasen ten opzichte van de gemiddelde curve is als functie van de gemeten rotorhoek afgebeeld in figuur B7.4 en B7.5. Dit is gedaan voor een rotorhoek tussen -50° en $+50^\circ$, omdat bij grotere rotorhoeken de slechtere stabiliteit van de meting duidelijk invloed kreeg op de nauwkeurigheid van de meting.



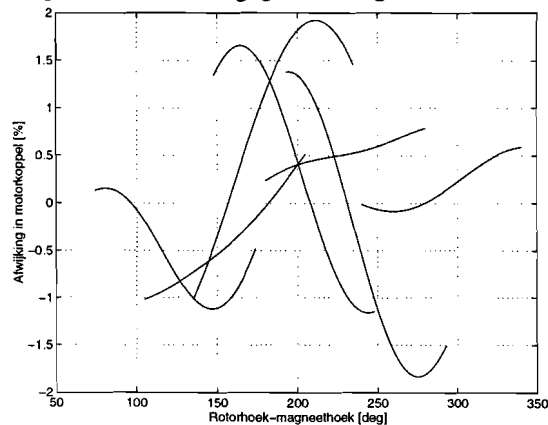
Figuur B7.4 MAXON 13Re032-11



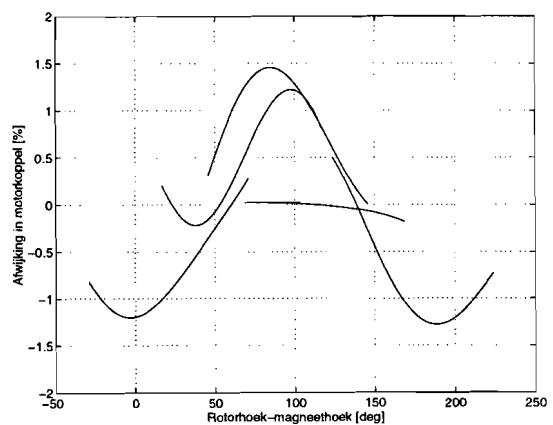
Figuur B7.5 ESCAP 22C11-216E

Het verschil tussen de verschillende fasen als functie van de gemeten rotorhoek

De afwijkingen ten opzichte van de gemiddelde curve als functie van de rotorhoek ten opzichte van de magneethoek is weergegeven in figuur B7.6 en B7.7.



Figuur B7.6 MAXON 13Re032-11



Figuur B7.7 ESCAP 22C11-216E

Het verschil tussen de verschillende fasen als functie van de rotorhoek ten opzichte van de magneethoek

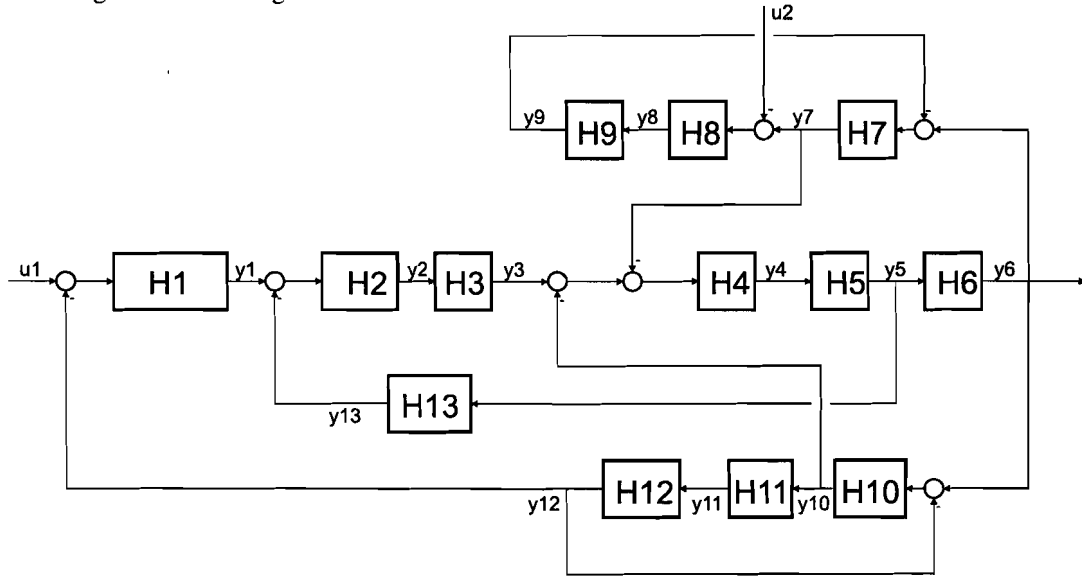
Conclusie

- Uit de figuren B7.4 tot en met B7.7 volgt dat de verschillende fasen van de geteste motoren met een nauwkeurigheid van beter dan 2% van het maximaal te leveren motorkoppel aan elkaar gelijk zijn. Omdat de nauwkeurigheid van de meting enerzijds beïnvloed is door wrijvingskoppels van de lagers in de motoren en de gebruikte koppelmeter en anderzijds door de beperkte nauwkeurigheid van de aflezing van de hoeken, moeten de berekende nauwkeurigheden beschouwd worden als een bovengrens voor de werkelijk optredende onnauwkeurigheden. Een nauwkeurigheid van beter dan twee procent is van dezelfde orde van grootte als de nauwkeurigheden die behaald worden door het totale meetinstrument met een constant veronderstelde motorconstante (zie tabel 5.1 en 5.2). Dit type motoren kan dus gebruikt worden in de meetunits.
- Een kalibratie van de verschillende fasen kan een duidelijke verbetering in nauwkeurigheid bieden. Het bepalen van de afwijkingen is met behulp van de opstelling van figuur B7.1 mogelijk

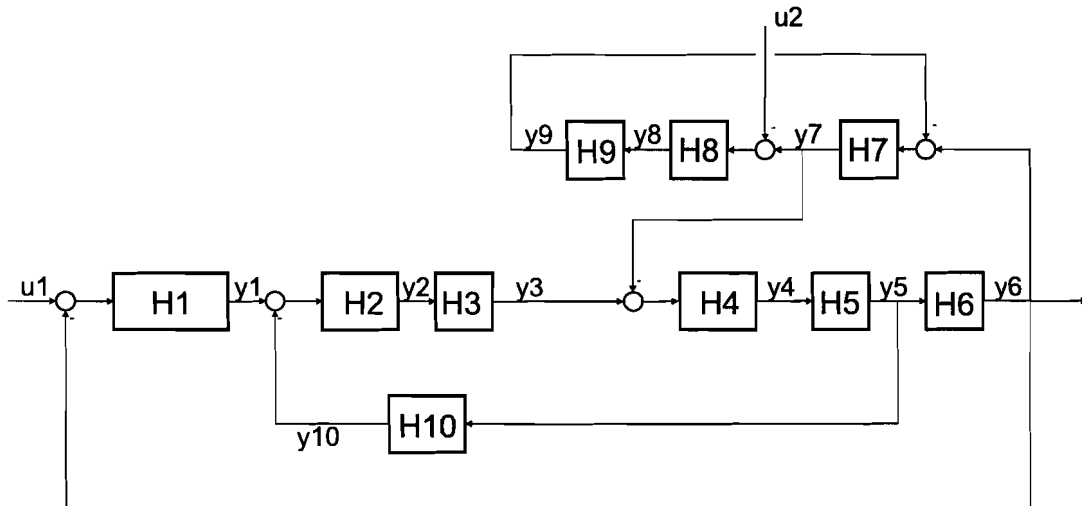
B8 De berekening van de modellering van de servosystemen

Computerinvoer

Voor het opstellen van de stelsels vergelijkingen die ingevoerd zijn in het softwarepakket Maple[®] zijn de blokschema's gebruikt uit de figuren B8.1 en B8.2.



Figuur B8.1 Het blokschema behorend bij de hoge resolutie servosystemen



Figuur B8.2 Het blokschema behorend bij de lage resolutie servosystemen

De samengestelde overdrachtsfuncties zijn berekend aan de hand van onderstaande vergelijkingen:

Hoge resolutie servosystemen:

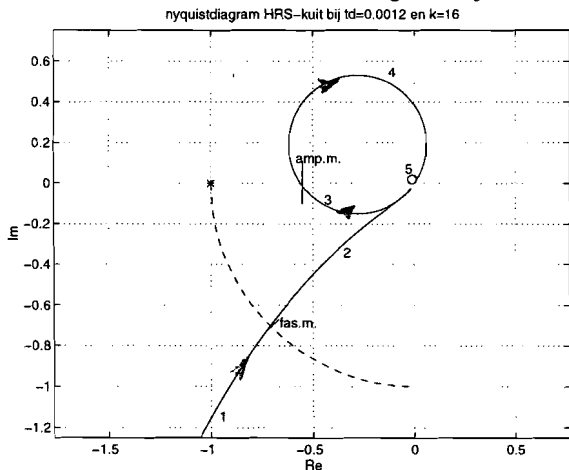
$$\begin{aligned}
 y1 &= H1 * (u1 - y12) & H1 &= k * ((td * ti * s^2 + ti * s + 1) / (ti * s)) \\
 y3 &= H2 * H3 * (y1 - y13) & H2 &= 1 / (L * s + R) \\
 y5 &= H4 * H5 * (y3 - (y7 - y10) - y10) & H3 &= kem \\
 y6 &= H6 * y5 & H4 &= 1 / Jspo \\
 y7 &= H7 * (y6 - y9) & H5 &= 1 / s \\
 y9 &= H9 * H8 * (y7 - u2) & H6 &= 1 / s \\
 y10 &= H10 * (y6 - y12) & H7 &= kuit \\
 y12 &= H11 * H12 * y10 & H8 &= 1 / Juit \\
 y13 &= H13 * y5 & H9 &= 1 / (s^2) \\
 & & H10 &= kenc \\
 & & H11 &= 1 / Jenc \\
 & & H12 &= 1 / (s^2) \\
 & & H13 &= kem
 \end{aligned}$$

Lage resolutie servosystemen:

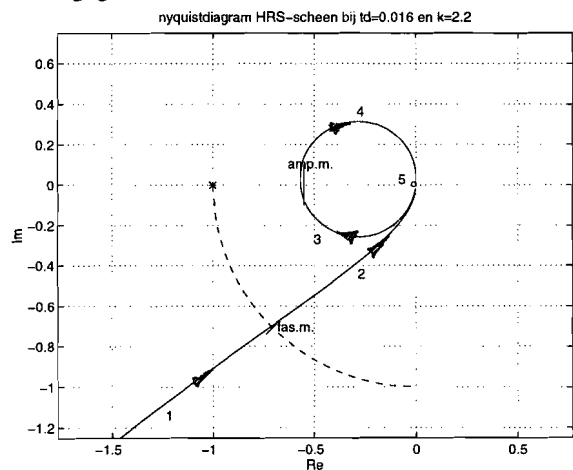
$$\begin{aligned}
 y1 &= H1 * (u1 - y6) & H1 &= k * ((td * ti * s^2 + ti * s + 1) / (ti * s)) \\
 y2 &= H2 * (y1 - y10) & H2 &= 1 / (L * s + R) \\
 y3 &= H3 * y2 & H3 &= kem \\
 y4 &= H4 * (y3 - y7) & H4 &= 1 / (Jspo + Jenc) \\
 y5 &= H5 * y4 & H5 &= 1 / s \\
 y6 &= H6 * y5 & H6 &= 1 / s \\
 y7 &= H7 * (y6 - y9) & H7 &= kuit \\
 y8 &= H8 * (y7 - u2) & H8 &= 1 / Juit \\
 y9 &= H9 * y8 & H9 &= 1 / (s^2) \\
 y10 &= H10 * y5 & H10 &= kem
 \end{aligned}$$

De instellingen van de regelaar volgens de Nyquistcriteria

Voor alle ontwerpen van de servosystemen zijn de instellingen gezocht van de versterkingsfactor k en de dempingsfactor τ_d waarbij exact voldaan wordt aan het fasemarge-criterium en amplitudemarge-criterium van Nyquist. In onderstaande figuren B8.3 tot en met B8.8 zijn de Nyquistdiagrammen weergegeven waarbij aan deze criteria wordt voldaan. In de figuren zijn de instellingen weergegeven.

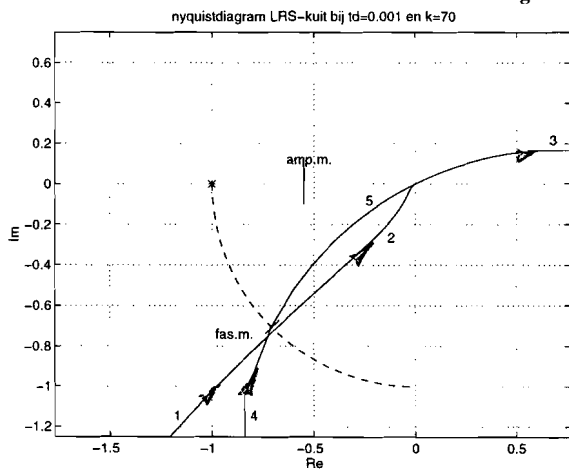


Figuur B8.3 Kuitspijermeting

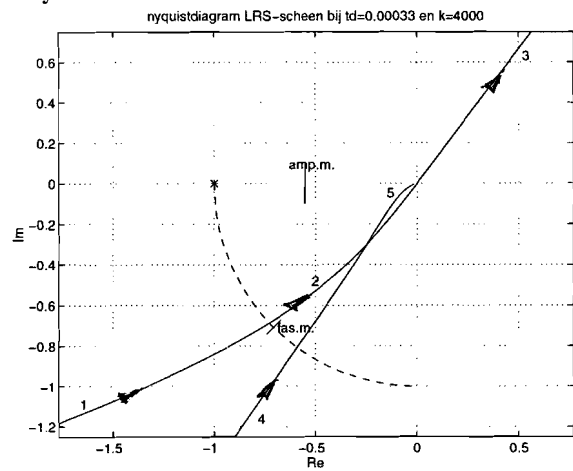


Figuur B8.4 Scheenspijermeting

De hoge resolutie servosystemen



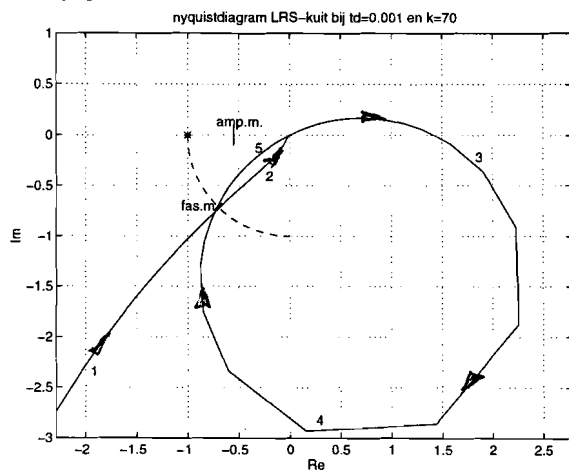
Figuur B8.5 Kuitspijermeting



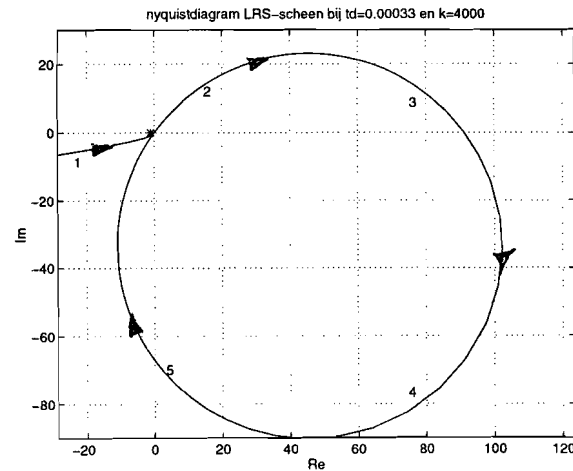
Figuur B8.6 Scheenspijermeting

De lage resolutie servosystemen

Van de hoge resolutie systemen zijn in de onderstaande figuren B8.7 en B8.8 de gehele Nyquistdiagrammen weergegeven.



Figuur B8.7 Kuitspijermeting



Figuur B8.8 Scheenspijermeting

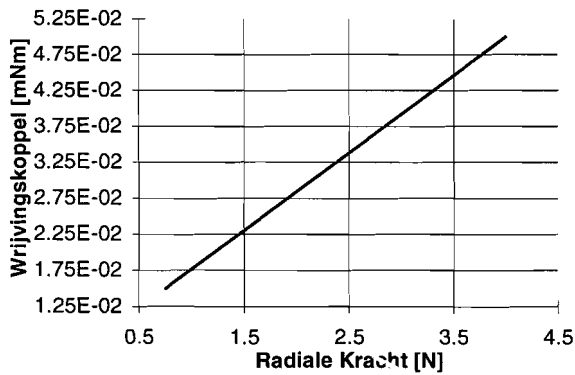
De lage resolutie servosystemen

B9 De wrijvingsberekening van de lagers in de servosystemen

Volgens Fabrikant MPB Europa:

Radiale kracht [N]	Startkoppel [mNm]
0.75	$1.5 \cdot 10^{-2}$
4	$5.0 \cdot 10^{-2}$

Uitgegaan van een lineair verband is in onderstaande figuur het wrijvingskoppel per lager als functie van de radiale kracht uitgezet.

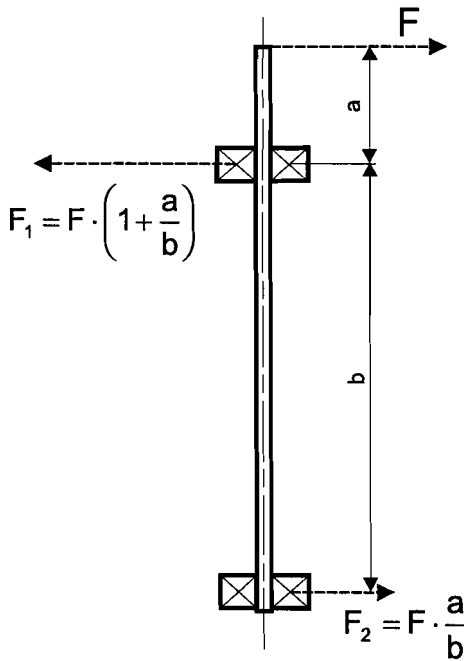


Bij deze grafiek kan onderstaande formule worden opgesteld:

$$M_w = 1.08 \cdot 10^{-2} \cdot F_{\text{rad}} + 0.69 \cdot 10^{-2} \quad [\text{mNm}]$$

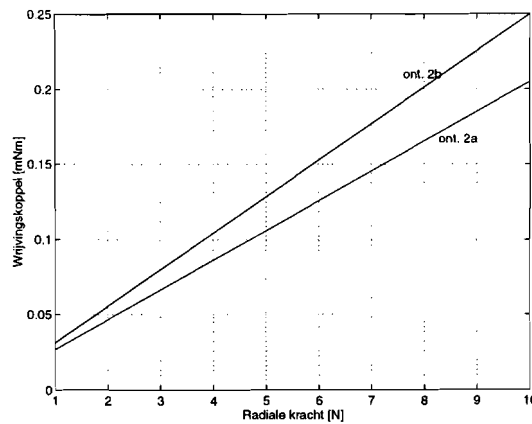
De belastingsituatie van ontwerp 2 is weergegeven in onderstaande figuur.

Het totale wrijvingsmoment wordt gegeven door onderstaande formule:



$$M_w = M_{w1} + M_{w2} = 1.08 \cdot 10^{-2} \cdot \left(F \cdot \left(1 + 2 \frac{a}{b} \right) \right) + 0.69 \cdot 10^{-2} \quad [\text{mNm}]$$

In onderstaande figuur zijn de wrijvingskoppel als functie van de radiale kracht uitgezet.

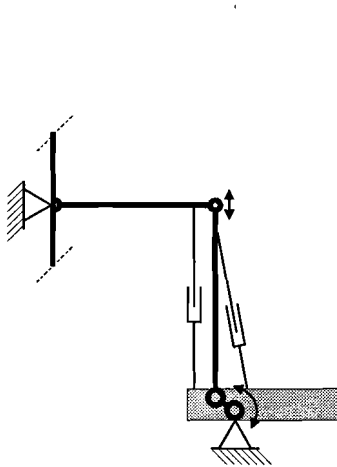


Afmetingen zijn in onderstaande tabel weergegeven.

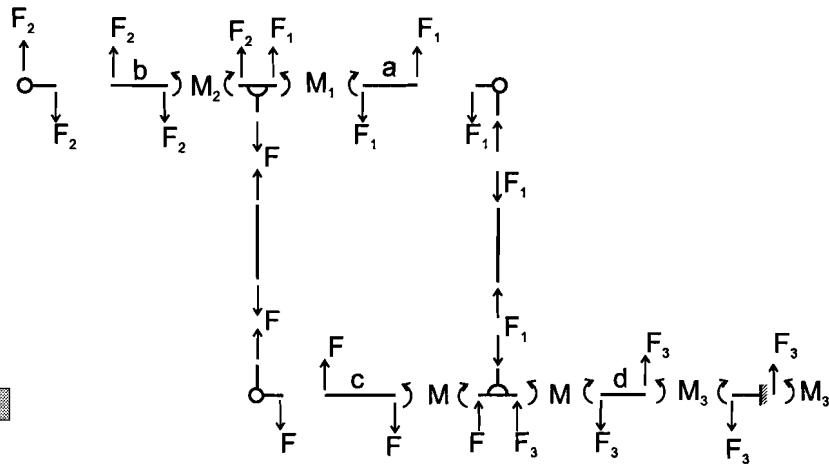
	a [mm]	b [mm]
HRS-kuit	25	60
HRS-scheen	8	40
LRS-kuit	25	60
LRS-scheen	8	40

B10 Het krachtenspel in de muizepoot

Voor de bestudering van het krachtenspel passen we de methode van het vrijmaken toe op de poot van de muis. We gebruiken daarvoor het model uit figuur B10.1. Na het vrijmaken ziet het krachtenspel bij kuitspiercontractie eruit als weergegeven in figuur B10.2.



Figuur B10.1 Het model van de muizepoot



Figuur B10.2 Het krachtenspel na het vrijmaken

a = afstand aanhechting kuitspier tot kniegewricht

b = afstand aanhechting kuitspier tot heupgewricht

c = momentsarm kuitspier tot enkelgewricht

d = excentriciteit enkelgewricht motoras

F = kracht door kuitspier (interessante kracht)

M = moment om enkelas door kuitspier (interessant moment)

Berekening levert:

$$F_1 = \frac{b}{a+b} \cdot F$$

$$F_2 = \frac{a}{a+b} \cdot F$$

$$M_1 = M_2 = \frac{ab}{a+b} \cdot F$$

$$F_3 = -\frac{a}{a+b} \cdot F$$

$$M_3 = \left(\frac{ad}{a+b} + c \right) \cdot F$$

$$M = F \cdot c$$

Aan de motoras meten we een koppel gelijk aan M_3 . Omdat we alleen geïnteresseerd zijn in het koppel M meten we dus een afwijking van:

$$e = \frac{M_3 - M}{M_3} \cdot 100\% = \frac{ad}{bc + ac + ad} \cdot 100\%$$

B11 De tekeningen van de meetunits

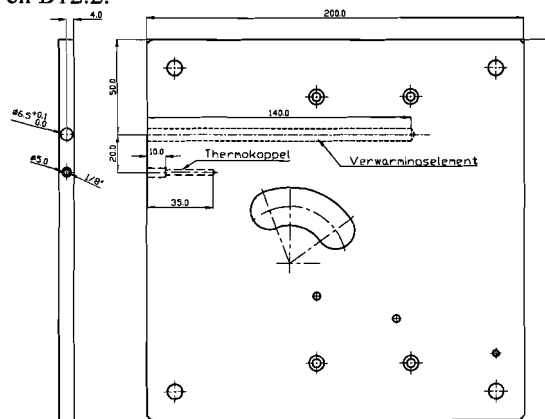
De tekeningen van de meetunits zijn weergegeven op de laatste pagina van dit verslag

B12 De berekeningen van de warmteoverdracht van het meetplateau

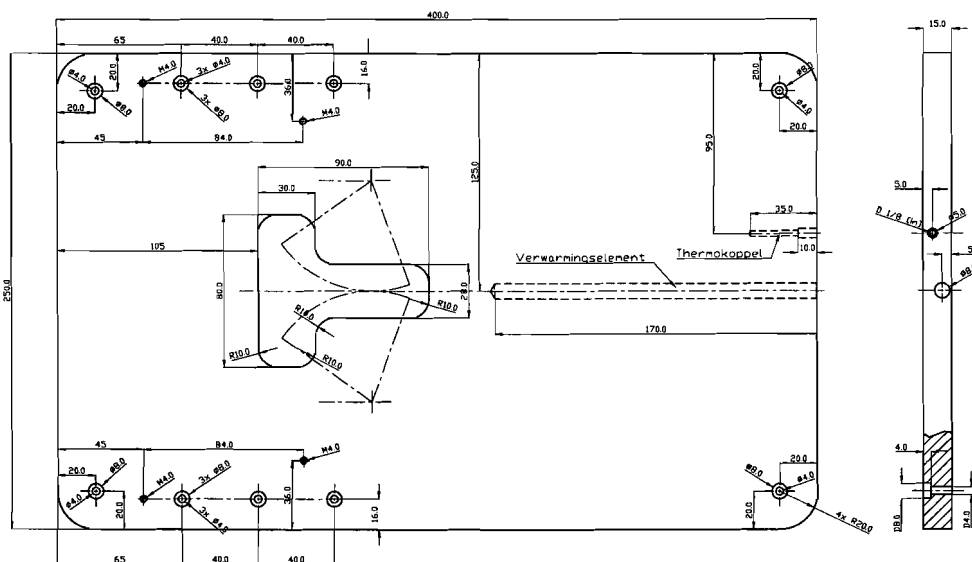
Experimenten

Beschrijving

Ter bepaling van het benodigde vermogen voor het verwarmen van het meetplateau zijn er experimenten uitgevoerd met het aluminium meetplateau van de prototype van de muisfixatie. Er is eveneens een proef gedaan met het aluminium meetplateau van een ontworpen rattefixatie. De afmetingen van deze plateaus zijn weergegeven in figuren B12.1 en B12.2.



Figuur B12.1 De dimensies van het meetplateau van de staartfixatie voor de muis (prototype 2), schaal 1:4



Figuur B12.2 De dimensies van het meetplateau van de staartfixatie voor de rat (prototype 1), schaal 1:4

In beide meetplateaus is een verwarmingselement aangebracht met een vermogen van 600 Watt, en is een thermokoppel 'type J' gebruikt. Er is een digitale temperatuurregelaar met autotune gebruikt, welke in staat is automatisch de optimale regelinstellingen te bepalen. Als versterker is een solid-state relais gebruikt. De opbouw van de regeling is weergegeven in figuur B12.3.

Het gebruikte verwarmingselement voor het meetplateau van de muis:

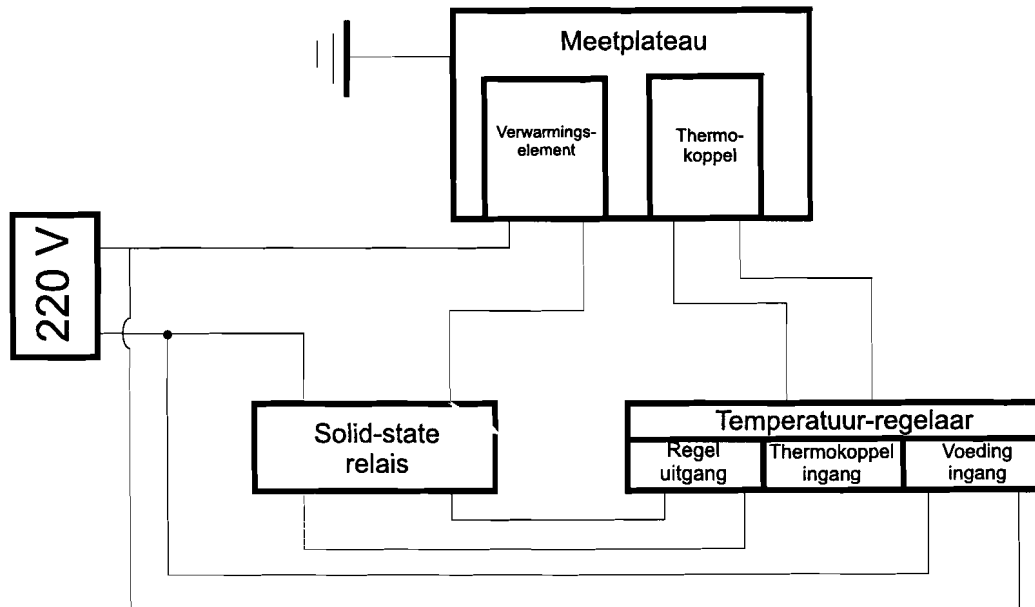
- Type EE 130 A5
- Leverancier Kurval, Haverstraat 39, Nieuw-Vennep

Het gebruikte verwarmingselement voor het meetplateau van de rat:

- Type EE 160 A3
- Leverancier Kurval, Haverstraat 39, Nieuw-Vennep

De gebruikte temperatuur-regeling:

- Type CAL 3200, CAL Controls
- Leverancier CAL Controls Ltd., Bury Mead Road, Hitchin, Herts, SG5 1RT, UK, tel: 0462-436161, fax: 0462-451801



Figuur B12.3 De opbouw van de temperatuur regeling

Berekeningen ten aanzien van het benodigde vermogen

De energiebalans luidt als volgt:

$$\text{Toegevoerde warmte} = \text{Opgeslagen warmte} + \text{Warmteverlies aan omgeving}$$

In stationaire toestand geldt per tijdseenheid:

$$\text{Toegevoerd vermogen} = \text{Verliesvermogen aan omgeving} = Q_{\text{convectie}} + Q_{\text{straling}}$$

$$Q_{\text{conv}} = h_c \cdot A \cdot (T_{\text{plat}} - T_{\text{omg}})$$

$$Q_{\text{str}} = \sigma \cdot A \cdot F_{(\text{plat-omg})} \cdot \epsilon_{\text{plat}} \cdot (T_{\text{plat}}^4 - T_{\text{omg}}^4)$$

Aluminium heeft de volgende eigenschappen (Janna):

- Spec. heat: $c_p = 896$ [J/(kg·K)]
- Thermal conductivity: $k = 236$ [W/(m·K)]
- Diffusivity: $\alpha = 97.5 \cdot 10^6$ [m²/s]
- Density: $\rho = 2702$ [kg/m³]
- Normal emissivity (ruw grijs lichaam): $\epsilon = 0.07$

Verder zijn de volgende gegevens van belang (Janna):

- Heat transfer coefficient: $h_c = 5 \sim 25$ [W/(m²·K)]
(Voor stilstaande lucht in natuurlijke convectie)

Vanwege de slechte omstandigheden voor conductie in het lab is een waarde van $h_c = 5$ W/(m²·K) genomen.

- Stefan Boltzmann Constant: $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ [W/(m²·K⁴)]
- Shape factor: $F_{(\text{plat-omg})} = 1$
(Alle energie wordt opgenomen door de omringende lucht)

Voor de oppervlakken van de meetplateau grenzend aan de omringende lucht geldt ongeveer:

- Oppervlak meetplateau van de muis: $A_{\text{muis}} = 0.08 \text{ [m}^2\text{]}$
- Oppervlak meetplateau van de rat: $A_{\text{rat}} = 0.2 \text{ [m}^2\text{]}$

Hieruit volgt voor een plateau-temperatuur van 40°C:

Meetplateau muis:

$$\begin{aligned} Q_{\text{conv}} &= 8 \text{ Watt} \\ Q_{\text{str}} &= 0.7 \text{ Watt} \\ \text{Benodigd: } Q_{\text{ben}} &= 9 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Meetplateau rat:

$$\begin{aligned} Q_{\text{conv}} &= 20 \text{ Watt} \\ Q_{\text{str}} &= 1.8 \text{ Watt} \\ \text{Benodigd: } Q_{\text{ben}} &= 22 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Resultaten

Na het proces van autotune en na de opwarming van de meetplateaus zijn de instellingen van de regelaar af te lezen van een display. De TDC-waarden geven aan hoeveel procent van een bepaalde cyclustijd het maximale vermogen van de verwarmingselementen aan de plateaus wordt toegevoerd. Deze TDC-waarden en cyclustijden zijn weergegeven in onderstaande tabel B12.1.

Tabel 12.1 De instellingen van de regelaar in stationaire toestand ($T_{\text{plat}} = 40^\circ\text{C}$) met het daaruit berekend toegevoerd vermogen

	Tour-Duty-Cycle	Cyclustijd	Toegevoerd vermogen
Meetplateau van de muis	2 %	2.8 sec	10 Watt
Meetplateau van de rat	3 %	8.0 sec	20 Watt

Berekening van het benodigde verwarmingsvermogen voor het meetplateau in het ontworpen meetinstrument

Het totale oppervlak van het meetplateau blootgesteld aan de omringende lucht is ongeveer gelijk aan 0.032 m².

Hieruit zijn de volgende verliesvermogens te bepalen bij een temperatuur van 40°C van het meetplateau:

$$\begin{aligned} Q_{\text{conv}} &= 3.2 \text{ Watt} \\ Q_{\text{str}} &= 0.28 \text{ Watt} \\ \text{Benodigd: } Q_{\text{ben}} &= 3.5 \text{ Watt} \end{aligned}$$

De totale hoeveelheid energie die toegevoegd moet worden om het totale volume van het meetplateau op een temperatuur van 40°C te brengen is gelijk aan:

$$E = c_p \cdot m \cdot \Delta T = 15200 \text{ J}$$

Met een verwarmingselement van 50 Watt en geen beperkingen in de warmtegeleiding zou de opwarming van het meetplateau 5 minuten duren.

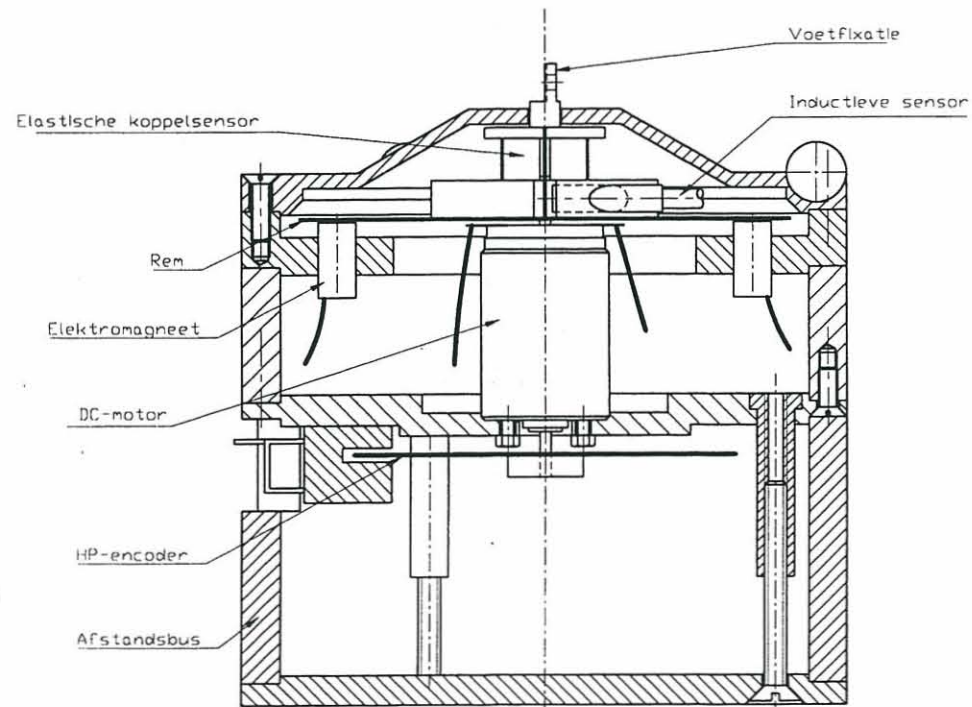
**HET ONTWERP VAN EEN MEETINSTRUMENT
VOOR HET MECHANISCH EN FYSIOLOGISCH
ONDERZOEK AAN SKELETSPIEREN VAN
MUIZEN**

april 1997

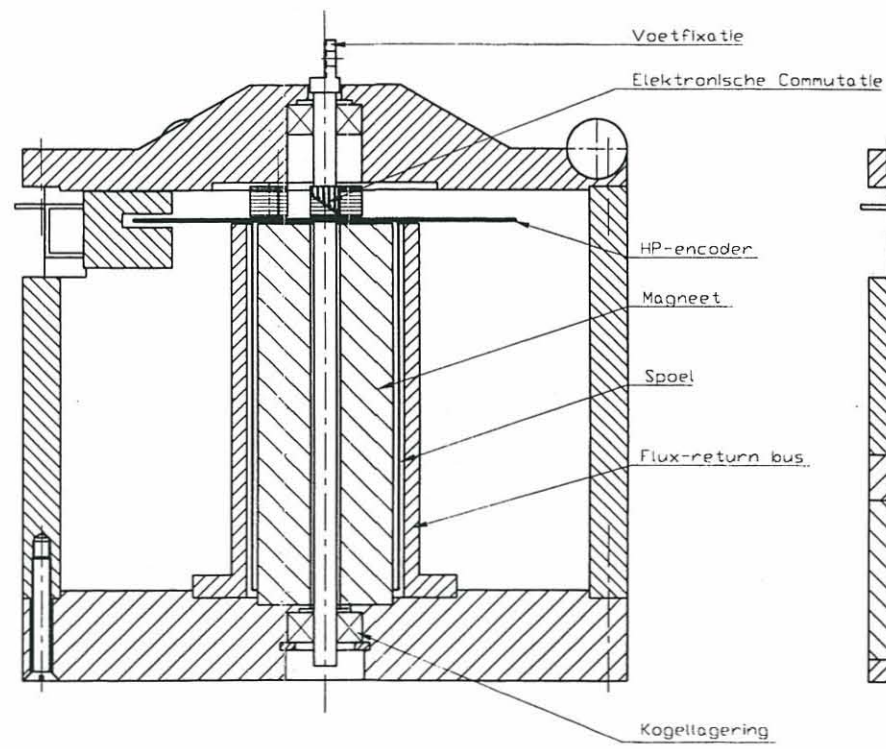
J.A.H. de Louw

Rapportnummer: WPA 310059

Statometer



Dynamometer
kuitspiermeting



Dynamometer
scheenspiermeting

