



**KATHOLIEKE UNIVERSITEIT LEUVEN**  
FACULTEIT TOEGEPASTE WETENSCHAPPEN  
DEPARTEMENT WERKTUIGKUNDE  
AFDELING PRODUKTIE-TECHNIEKEN,  
MACHINEBOUW EN AUTOMATISERING  
Celestijnenlaan 300B, B-3001 Leuven (Heverlee), België

# **ONTWIKKELING VAN EEN COMPUTER- PEN VOOR HET SCHRIJVEN IN EEN NIET-GESTRUCTUREERDE OMGEVING**

Jury:

Prof. dr. ir. E. Aernoudt (voorzitter)  
Prof. dr. ir. D. Reynaerts (promotor)  
Prof. dr. ir. H. Van Brussel (promotor)  
Prof. dr. ir. J. De Schutter  
Prof. dr. ir. R. Puers  
Prof. dr. ir. B. Raucant (UCL)  
Prof. dr. ir. F. Al Bender

Proefschrift voorgedragen tot  
het behalen van het doctoraat  
in de toegepaste wetenschappen

door

**Joeri CLIJNEN**

UDC 681.3\*I3

November 2003

© Katholieke Universiteit Leuven – Faculteit Toegepaste Wetenschappen  
Arenbergkasteel, B-3001 Heverlee (Belgium)

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt worden door middel van druk, fotokopie, microfilm, elektronisch of op welke andere wijze ook zonder voorafgaandelijke schriftelijke toestemming van de uitgever.

All rights reserved. No part of the publication may be reproduced in any form by print, photoprint, microfilm or any other means without written permission from the publisher.

D/2003/7515/56  
ISBN 90-5682-443-0  
UDC 681.3\*I3

# Voorwoord

Een doctoraat maak je nooit alleen. Daarom zou ik iedereen willen bedanken die een bijdrage aan dit werk geleverd heeft.

Hierbij denk ik op de eerste plaats aan prof. D. Reynaerts en prof. H. Van Brussel. Ik wil hen bedanken voor de kans die ze me boden om aan wetenschappelijk onderzoek te doen en uiteindelijk dit werk te schrijven. Hun raad en dagelijkse begeleiding was van onschatbare waarde.

De leden van het leescomité, prof. R. Puers en prof. J. De Schutter, dank ik voor het kritisch nalezen van dit werk. Tevens wens ik prof. B. Raucant en prof. F. Al Bender te bedanken om de taak van bijkomend jurylid op zich te nemen. Prof. E. Aernoudt dank ik voor het in goede banen leiden van de doctoraatsverdediging.

Voorts wil ik alle thesisstudenten bedanken die tot dit werk bijgedragen hebben: B. Cosemans en G. Geysen, voor hun bijdrage in verband met de luchtbeweging, K. Plessers en R. Simons voor het ontwerp van een optische accelerometer en D. Verduyn voor zijn hulp bij de identificatie van de wrijving.

Daarnaast wil ik alle collega's - in het bijzonder de mensen van de micro- en precisiegroep - bedanken voor de aangename werksfeer en hun hulp bij het oplossen van alle kleine en grote problemen. Hierbij wil ik speciaal Wim bedanken, die me overhaalde om met dit doctoraat te beginnen. Verder wil ik alle ondersteunende diensten bedanken voor hun vaak verborgen bijdrage aan dit doctoraat.

Tot slot wens ik mijn familie te bedanken, in het bijzonder mijn ouders voor hun jarenlange steun en inzet.

Joeri Clijnen  
oktober 2003





# Abstract

In dit doctoraat is een compact invoerapparaat voor mobiele toepassingen zoals laptops, PDA's en GSM's ontwikkeld. Dit invoerapparaat bestaat uit een intelligente computerpen, die zijn positie aan de hand van interne sensoren bepaalt. Op deze manier kan de computerpen zijn beweging en dus de geschreven tekst reconstrueren op het computerscherm. Om geen eisen aan de omgeving op te leggen, werkt deze computerpen in een niet-gestructureerde omgeving, zonder toevoeging van kunstmatige vaste bakens.

Het werkingsprincipe van deze computerpen is gebaseerd op een drie-assige kracht-sensor, die de snelheidsafhankelijke wrijvingskracht tussen penpunt en papier meet, en een oriëntatiesensor, die de oriëntatie van de pen meet. Met de informatie van deze sensoren kan de snelheid van de penpunt berekend worden. Integratie van deze snelheid geeft de positie van de penpunt en dus de reconstructie van het geschreven woord. In de lucht kan geen beweging gemeten worden aangezien de wrijvingskrachten dan wegvallen. Uitbreiding naar het meten van de beweging in de lucht door middel van een bijkomende accelerometer is echter niet mogelijk. De nauwkeurigheid van een oriëntatiesensor is immers met de huidige stand van de techniek te beperkt.

De focus van het doctoraat ligt op het meten van de beweging tijdens het schrijven op papier. De vereiste drie-assige krachtsensor en de oriëntatiesensor zijn ontwikkeld en de wrijving tussen penpunt en papier is gemodelleerd. Dit onderzoek resulteert in een prototype van een schrijvende computerpen. Schrijfproeven met dit prototype tonen aan dat de ontwikkelde computerpen in staat is om losse letters in het Graffiti handschrift te reconstrueren. Ook het reconstrueren van woorden die in één pennentrek met een natuurlijk handschrift geschreven zijn, is mogelijk.



# Inhoudsopgave

<b>Inhoudsopgave</b>	<b>i</b>
<b>Symbolenlijst</b>	<b>v</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1 Stand der techniek inzake invoerapparaten . . . . .	1
1.1.1 Toetsenborden . . . . .	1
1.1.2 Muizen en trackballs . . . . .	2
1.1.3 Joysticks . . . . .	3
1.1.4 Digitaliseertabletten . . . . .	3
1.1.5 Spraakherkenning . . . . .	4
1.1.6 Scanners . . . . .	4
1.1.7 Overzicht . . . . .	5
1.2 Intelligente computerpennen . . . . .	6
1.2.1 De Anoto pen . . . . .	6
1.2.2 De VPen van OTM Technologies . . . . .	7
1.2.3 De Compupen van Pen2Net . . . . .	8
1.2.4 De E-pen . . . . .	8
1.2.5 De SmartQuill van BT Technologies . . . . .	9
1.2.6 De Smartpen . . . . .	9
1.2.7 Samenvatting . . . . .	10
1.3 Doel van het doctoraat . . . . .	11
1.4 Besluit . . . . .	12
<b>2 Specificaties van een computerpen</b>	<b>15</b>
2.1 Definities . . . . .	15
2.2 Algemene specificaties . . . . .	16
2.3 Meet- en frequentiebereik van de sensoren . . . . .	18
2.3.1 Inleiding . . . . .	18
2.3.2 Opmeten van de penbeweging . . . . .	19
2.3.3 Opmeten van de contactkrachten tijdens het schrijven . . . . .	24
2.4 Nauwkeurigheid van de sensoren . . . . .	25
2.4.1 Vereiste nauwkeurigheid tijdens de schrijffase . . . . .	25
2.4.2 Vereiste nauwkeurigheid tijdens de luchtfase . . . . .	27
2.5 Besluit . . . . .	30

<b>3</b>	<b>Oriëntatiesensor</b>	<b>31</b>
3.1	Specificaties . . . . .	31
3.2	Meetprincipes . . . . .	32
3.2.1	Rechtstreekse oriëntatiemeting op basis van het zwaartekrachtsveld . . . . .	32
3.2.2	Rechtstreekse oriëntatiemeting op basis van het aardmagne- tisch veld . . . . .	39
3.2.3	Onrechtstreekse oriëntatiemeting op basis van de hoeksnelheid	47
3.2.4	Onrechtstreekse oriëntatiemeting op basis van de hoekversnel- ling . . . . .	51
3.2.5	Keuze meetprincipe . . . . .	54
3.3	Ontwerp . . . . .	55
3.3.1	Accelerometer . . . . .	55
3.3.2	Magnetische sensor . . . . .	56
3.3.3	Samenbouw oriëntatiesensor . . . . .	57
3.3.4	Algoritme . . . . .	58
3.4	Kalibratie . . . . .	60
3.4.1	Principe . . . . .	60
3.4.2	Kalibratiestand . . . . .	61
3.4.3	Kalibratie van de oriëntatiesensor . . . . .	63
3.5	Besluit . . . . .	65
<b>4</b>	<b>Krachtsensor</b>	<b>67</b>
4.1	Inleiding . . . . .	67
4.2	Meetprincipes . . . . .	68
4.2.1	Kracht meten via spanning . . . . .	68
4.2.2	Kracht meten via rek . . . . .	70
4.2.3	Kracht meten via verplaatsing . . . . .	74
4.2.4	Kracht meten via druk . . . . .	78
4.2.5	Kracht meten via resonantiefrequentie . . . . .	78
4.2.6	Bespreking meetprincipes . . . . .	79
4.3	Piëzo-krachtsensor . . . . .	80
4.3.1	Het piëzo-element . . . . .	80
4.3.2	Voorstudie . . . . .	82
4.3.3	Ontwerp . . . . .	85
4.3.4	Testen . . . . .	86
4.3.5	Bespreking . . . . .	88
4.4	Optische krachtsensor . . . . .	88
4.4.1	Optische componenten voor miniatuursensoren . . . . .	89
4.4.2	Voorstudie: verplaatsingsmeetsysteem . . . . .	94
4.4.3	Ontwerp . . . . .	99
4.4.4	Realisatie prototype . . . . .	104
4.4.5	Testen . . . . .	105
4.4.6	Richtlijnen voor toekomstige verbeteringen . . . . .	109
4.4.7	Bespreking . . . . .	110
4.5	Besluit . . . . .	111

<b>5</b>	<b>Wrijvingsmodel</b>	<b>113</b>
5.1	Inleiding tot wrijving . . . . .	113
5.2	Ontwerp van de tribometer . . . . .	116
5.2.1	Concept . . . . .	116
5.2.2	Opbouw . . . . .	117
5.3	Voorstudie . . . . .	118
5.3.1	Referentie-wrijvingskarakteristiek . . . . .	119
5.3.2	Parameterstudie . . . . .	120
5.3.3	Besluit . . . . .	124
5.4	Identificatie van het wrijvingsmodel . . . . .	124
5.4.1	Wrijvingsmodel in één dimensie . . . . .	124
5.4.2	Wrijvingsmodel in twee dimensies . . . . .	126
5.4.3	Samenvatting . . . . .	128
5.5	Validatie van het wrijvingsmodel . . . . .	129
5.5.1	Beschrijving van de experimenten . . . . .	129
5.5.2	Bespreking van de experimenten . . . . .	130
5.6	Besluit . . . . .	132
<b>6</b>	<b>Schrijvende computerpen</b>	<b>135</b>
6.1	Ontwikkelen van het prototype . . . . .	135
6.2	Ontwikkelen van de software . . . . .	137
6.3	Schrijftesten . . . . .	140
6.3.1	Schrijven van het Graffiti alfabet . . . . .	140
6.3.2	Schrijven van een woord uit één pennentrek . . . . .	142
6.4	Besluit . . . . .	143
<b>7</b>	<b>Algemeen besluit</b>	<b>145</b>
	<b>CV Auteur</b>	<b>149</b>
	<b>Bibliografie</b>	<b>150</b>
<b>A</b>	<b>Voorgaand Smartpen project</b>	<b>159</b>
A.1	Algemene beschrijving . . . . .	159
A.1.1	Onderdelen van het prototype . . . . .	159
A.1.2	Werkingsprincipe . . . . .	160
A.2	Krachtsensor . . . . .	161
A.2.1	Specificaties . . . . .	161
A.2.2	Principe . . . . .	161
A.2.3	Experimentele resultaten . . . . .	163
A.3	Oriëntatiesensor . . . . .	164
A.4	Wrijvingsmodel . . . . .	165
A.5	Bespreking voorgaand project . . . . .	165
A.5.1	Bespreking krachtsensor . . . . .	165
A.5.2	Bespreking oriëntatiesensor . . . . .	166
A.5.3	Bespreking wrijvingsmodel . . . . .	166
A.6	Besluit . . . . .	166

<b>B</b>	<b>Hoekconventies</b>	<b>169</b>
B.1	Definities . . . . .	169
B.1.1	Eulerhoeken . . . . .	169
B.1.2	RPY-hoeken . . . . .	170
B.2	Transformatiematrices . . . . .	171
<b>C</b>	<b>Formules bij de oriëntatiemeetprincipes</b>	<b>173</b>
C.1	Meetprincipe op basis van de zwaartekracht . . . . .	173
C.1.1	Formules voor de hoeken . . . . .	173
C.1.2	Formules voor de foutenvoortplanting bij een twee-assige accelerometer . . . . .	175
C.2	Meetprincipe op basis van het aardmagnetisch veld . . . . .	176
C.2.1	Formules voor de Euler-hoeken . . . . .	176
C.2.2	Formules voor de foutenvoortplanting bij een twee-assige magnetische sensor . . . . .	177
C.3	Meetprincipe op basis van de hoeksnelheid . . . . .	178
C.3.1	Formules voor het verband tussen Euler-hoeken en projectie van de ogenblikkelijke rotatievector . . . . .	178
C.3.2	Formules voor de foutenvoortplanting bij enkelvoudige integratie . . . . .	178
C.4	Meetprincipe op basis van de hoekversnelling . . . . .	179
C.4.1	Formule voor dubbele integratie . . . . .	179
C.4.2	Formules voor foutenvoortplanting . . . . .	179
<b>D</b>	<b>Optische accelerometer</b>	<b>181</b>
D.1	Principe . . . . .	181
D.2	Ontwerp . . . . .	182
D.3	Productie . . . . .	183
D.4	Testen . . . . .	183
D.5	Vergelijking met de ADXL202 . . . . .	185
<b>E</b>	<b>Elektrisch schema van prototype</b>	<b>187</b>
E.1	Voeding en referentiespanning . . . . .	187
E.2	Elektrisch schema voor de ADXL202 . . . . .	187
E.3	Elektrisch schema voor de HMC1022 . . . . .	189
E.4	Elektrisch schema voor de optische krachtsensor . . . . .	189
<b>F</b>	<b>IJking van de kalibratiestand</b>	<b>191</b>
F.1	Bijregelen van de elevatie-as en de spin-as . . . . .	191
F.2	Waterpas zetten van de kalibratiestand . . . . .	192
<b>G</b>	<b>Software voor reconstructie van tekst</b>	<b>195</b>
G.1	Hoofdprogramma . . . . .	195
G.2	Hulpprogramma 1: de functie ADXL2hoek . . . . .	201
G.3	Hulpprogramma 2: de functie HMC2hoek . . . . .	202
G.4	Hulpprogramma 3: de functie RPYangles2R . . . . .	205
G.5	Hulpprogramma 4: de functie ZYZEuler2R . . . . .	205

# Symbolenlijst

Algemene afspraak: superscript *papier* wordt gebruikt voor grootheden uitgedrukt in het papier-assenstelsel en het superscript *pen* wordt gebruikt voor grootheden die uitgedrukt zijn in het pen-assenstelsel.

symbool	betekenis	eenheid
$\alpha$	hoek tussen $x^{papier}$ -as en $x^{pen}$ -as (2D benadering)	$^\circ$
$\alpha_0$	beginhoek (integratieconstante bij integratie van hoeksnelheid)	$^\circ$
$\dot{\alpha}$	hoeksnelheid	$^\circ/\text{s}$
$\dot{\alpha}_0$	beginhoeksnelheid (integratieconstante bij integratie van hoekversnelling)	$^\circ/\text{s}$
$\alpha_{waterpas}$	scheefstelling ten opzichte van een verticale	$^\circ$
$\vec{\alpha}$	hoeksnelheid	$^\circ/\text{s}$
$\vec{\ddot{\alpha}}$	hoekversnelling	$^\circ/\text{s}^2$
$\ddot{\alpha}_x, \ddot{\alpha}_y, \ddot{\alpha}_z$	componenten van hoekversnellingsvector	$^\circ/\text{s}^2$
$\beta$	hoekverdraaiing van de vullinghouder ten opzichte van behuizing	$^\circ$
$\gamma$	hoekverdraaiing van de vullinghouder ten opzichte van behuizing	$^\circ$
$\gamma_{slinger}$	hoek gedefinieerd in figuur 3.1	$^\circ$
$\Delta\alpha$	systematische fout op $\alpha$	$^\circ$
$\Delta\dot{\alpha}$	systematische fout op $\dot{\alpha}$	$^\circ/\text{s}$
$\Delta\ddot{\alpha}$	systematische fout op $\ddot{\alpha}$	$^\circ/\text{s}^2$
$\Delta a$	systematische fout op de versnelling $a$	$\text{m}/\text{s}^2$
$\Delta a_j$	systematische fout op de versnelling $a$ op tijdstip $j$	$\text{m}/\text{s}^2$
$\Delta a_x, \Delta a_z$	systematische fout op de versnelling $a_x, a_y$	$\text{m}/\text{s}^2$
$\Delta R$	weerstandverandering	$\Omega$
$\Delta t$	tijdsduur tussen twee metingen	s
$\Delta v_k$	systematische fout op de snelheid $v$ op tijdstip $k$	m/s

$\Delta x$	systematische fout op de positie $x$	m
$\Delta x_n$	systematische fout op de positie $x$ in tijdstap $n$	m
$\Delta x_{rotatie}$	fout op de positie penpunt door foutieve meting oriëntatie	m
$\Delta x_{translatie}$	fout op de positie van de penpunt door foutieve meting van de positie van één LED	m
$\Delta x_A, \Delta y_A$	verplaatsing van blok A, gedefinieerd in figuur 4.30(a)	m
$\Delta x_p, \Delta y_p, \Delta z_p$	verplaatsing van de penpunt	m
$\Delta x_v, \Delta y_v, \Delta z_v$	verplaatsing van de vullinghouder	m
$\Delta z_C$	verplaatsing gedefinieerd in figuur 4.30(a)	m
$\varepsilon$	rek	
$\varepsilon_{max}$	maximale rek van een rekstrookje	
$\varepsilon_{medium}$	permittiviteit van een medium	F/m
$\theta$	elevatiehoek (ZYZ-Eulerhoeken)	°
$\theta_e$	uitlijningsfout gedefinieerd volgens RPY-hoeken	°
$\theta_{RPY}$	hoek rond de y-as bij RPY-hoeken (=stampen)	°
$\dot{\theta}$	afgeleide elevatiehoek $\theta$ naar de tijd	°/s
$\ddot{\theta}$	dubbele afgeleide elevatiehoek $\theta$ naar de tijd	°/s <sup>2</sup>
$\mu$	wrijvingscoëfficiënt	
$\mu_{dynamisch}$	dynamische wrijvingscoëfficiënt	
$\mu_{norm}$	genormaliseerde wrijvingscoëfficiënt	
$\mu_{statisch}$	statische wrijvingscoëfficiënt	
$\sigma_\alpha$	spreiding op $\alpha$	°
$\sigma_{\dot{\alpha}}$	spreiding op $\dot{\alpha}$	°/s
$\sigma_{\ddot{\alpha}}$	spreiding op $\ddot{\alpha}$	°/s <sup>2</sup>
$\sigma_\theta$	spreiding op $\theta$	°
$\sigma_{\dot{\theta}}$	spreiding op $\dot{\theta}$	°/s
$\sigma_\psi$	spreiding op $\psi$	°
$\sigma_\varphi$	spreiding op $\varphi$	°
$\sigma_a$	spreiding op versnelling $a$	m/s <sup>2</sup>
$\sigma_B$	spreiding op het magnetisch veld $\vec{B}$	T
$\sigma_{F_x}$	spreiding op $F_x$	N
$\sigma_{F_z}$	spreiding op $F_z$	N
$\sigma_{F_i^{pen}}$	spreiding op de krachtmeting $F_i^{pen}$	N
$\phi_{aarde}$	breedtegraad	°
$\varphi$	azimuthhoek (ZYZ-Eulerhoeken)	°
$\varphi_e$	uitlijningsfout gedefinieerd volgens RPY-hoeken	°
$\varphi_{RPY}$	hoek rond z-as bij RPY-hoeken (=rollen)	°
$\dot{\varphi}$	afgeleide azimuthhoek $\varphi$ naar de tijd	°/s
$\ddot{\varphi}$	dubbele afgeleide azimuthhoek $\varphi$ naar de tijd	°/s <sup>2</sup>



$\psi$	spinhoek (ZYZ-Eulerhoeken)	°
$\psi_e$	uitlijningsfout gedefinieerd volgens RPY-hoeken	°
$\psi_{RPY}$	hoek rond de x-as bij RPY-hoeken (=gieren)	°
$\dot{\psi}$	afgeleide spinhoek $\psi$ naar de tijd	°/s
$\ddot{\psi}$	dubbele afgeleide spinhoek $\psi$ naar de tijd	°/s <sup>2</sup>
$\omega_x \omega_y \omega_z$	componenten van hoeksnelheidsvector	°/s
$\{\mathbf{a}\}$	assenstelsel gedefinieerd in figuur B.1	
$a_{totaal}$	som van versnelling en zwaartekracht	m/s <sup>2</sup>
$a_x, a_y, a_z$	verschillende componenten van de versnelling	m/s <sup>2</sup>
$a_{x,gemeten},$ $a_{y,gemeten},$ $a_{z,gemeten}$	verschillende componenten die een accelerometer meet	m/s <sup>2</sup>
$\vec{a}_P$	versnelling van de penpunt	m/s <sup>2</sup>
$\vec{a}_{S1}$	versnelling gemeten door sensor S1	m/s <sup>2</sup>
$\vec{a}_{S2}$	versnelling gemeten door sensor S2	m/s <sup>2</sup>
$A$	oppervlakte	m <sup>2</sup>
$A_1, A_2$	oppervlaktes gedefinieerd in figuur 5.11(b)	m <sup>2</sup>
$\{\mathbf{b}\}$	assenstelsel gedefinieerd in figuur B.1	
$\vec{B}$	magnetisch veld	T
$B_x, B_y, B_z$	componenten van het magnetisch veld	T
$C_1 \dots C_4$	capaciteiten gedefinieerd in Bijlage E	F
$C_l$	capaciteit van de ladingsversterker	F
$d$	ladingsgevoeligheid	C/N
$d_{31}$	ladingsgevoeligheid bij schuifspanning	C/N
$d_{33}$	ladingsgevoeligheid bij drukspanning	C/N
$d_{plaat}$	afstand tussen twee capaciteitsplaten	m
$D$	declinatie van het magnetisch veld	°
$E$	elasticiteitsmodulus	Pa
$E_1, E_2$	energieniveau van een elektron	J
$E_h$	Hall-spanning	V
$f$	breekfrequentie	Hz
$F_{max}$	maximale wrijvingskracht bij een bepaalde snelheid	N
$F_{min}$	minimale wrijvingskracht bij een bepaalde snelheid	N
$F_N$	normaalkracht, loodrecht op het papier	N
$F_{ref}$	referentie normaalkracht (1N)	N
$F_w$	wrijvingskracht tussen penpunt en papier	N
$F_{w,x}, F_{w,y}$	x- en y-componenten van de wrijvingskracht tussen penpunt en papier	N
$F_x, F_y, F_z$	componenten van de kracht	N

$g$	zwaartekracht	$\text{m/s}^2$
$g_1, g_2$	gevoeligheden van de accelerometer ADXL202	$\text{V}/(\text{m/s}^2)$
$g_3, g_4$	gevoeligheden van de magnetische sensor HMC1022	$\text{V/T}$
$I$	inclinatie van het magnetisch veld	$^\circ$
$I_{dk}$	lekstroom van een fotodiode	$\text{A}$
$I_{foto}$	stroom in een fotodiode gegenereerd door het invallende licht	$\text{A}$
$I_{fotodiode}$	stroom door een fotodiode	$\text{A}$
$\vec{J}$	stroomdichtheid	$\text{A/m}^2$
$k$	constante van Boltzman	$\text{J/K}$
$k_x, k_y, k_z$	stijfheid in de x-, y- en z-richting	$\text{N/m}$
$K$	rekstrookjesfactor	
$l_1$	afstand gedefinieerd in figuur 4.29	$\text{m}$
$l_2$	afstand gedefinieerd in figuur 4.29	$\text{m}$
$L$	lengte	$\text{m}$
$m$	massa	$\text{kg}$
$M_x, M_y, M_z$	moment rond respectievelijk x-as en y-as	$\text{Nm}$
$n$	het aantal meetpunten	
$o_1, o_2$	offsetspanning van de accelerometer ADXL202	$\text{V}$
$o_3, o_4$	offsetspanning van de magnetische sensor HMC1022	$\text{V}$
$\vec{OA}$	afstand gedefinieerd in figuur 3.1	$\text{m}$
$\vec{p}^{vast}$	vector $p$ gedefinieerd in vast assenkruis	
$\vec{p}^{voorwerp}$	vector $p$ gedefinieerd in het assenkruis vast aan het voorwerp	
$q$	lading geproduceerd door een piëzo-element	$\text{C}$
$q_e$	lading van een elektron	$\text{C}$
$r_1$	straal vloeistofreservoir	$\text{m}$
$\vec{r}_{S1}$	afstand van penpunt tot accelerometer S1	$\text{m}$
$\vec{r}_{S2}$	afstand van penpunt tot accelerometer S2	$\text{m}$
$r_{S1, S2}$	afstand tussen accelerometer S1 en S2	$\text{m}$
$R$	weerstand	$\Omega$
$R$	transformatiematrix (in Bijlage B)	
$R_1 \dots R_6$	weerstand (in Bijlage E)	$\Omega$
$R_l$	lekweerstand van de ladingsversterker	$\Omega$
$R_{foto}$	weerstand gedefinieerd in figuur E.4	$\Omega$
$R_{LED}$	weerstand gedefinieerd in figuur E.4	$\Omega$
$R_{RPY}$	transformatiematrix bij RPY-Eulerhoeken	
$R1_{RPY}$	transformatiematrix voor uitlijningsfouten ADXL202	

$R2_{RPY}$	transformatiematrix voor uitlijningsfouten HMC1022	
$R_{ZYZ}$	transformatiematrix bij ZYZ-Eulerhoeken	
$t$	tijd	s
$T$	temperatuur	°C
$T_{curie}$	Curie-temperatuur van piëzo-materialen	°C
$v$	snelheid van de penpunt in het vlak van het papier	m/s
$v_x, v_y$	x- en y-componenten van de snelheid $v$	m/s
$V_0$	spanning over een fotodiode	V
$V_1, V_2$	signalen van de accelerometer ADXL202	V
$V_3, V_4$	signalen van de magnetische sensor HMC1022	V
$V_A, V_B, V_C, V_D$	signalen van een sensor	V
$\{xyz\}$	assenstelsel gedefinieerd in Bijlage F	
$\{x'y'z'\}$	assenstelsel gedefinieerd in Bijlage F	
$\{x''y''z''\}$	assenstelsel gedefinieerd in Bijlage F	



# Hoofdstuk 1

## Inleiding

*Paragraaf 1.1 geeft een overzicht van de huidige stand der techniek inzake invoerapparaten voor computers. Hieruit blijkt dat voor bepaalde - vooral draagbare - toepassingen een behoefte bestaat aan een alternatief invoerapparaat. Dit alternatief bestaat uit een intelligente computerpen, die toelaat om geschreven tekst in te voeren. Verschillende bedrijven zijn bezig met de ontwikkeling van hun computerpen, met elk een eigen gepatenteerd werkingsprincipe. Paragraaf 1.2 geeft een overzicht van de voornaamste onderzoeksprojecten. Aansluitend volgt de doelstelling van dit doctoraat, namelijk het ontwikkelen van een computerpen, die in een niet-gestructureerde omgeving (zonder kunstmatige vaste bakens) schrijft.*

### **1.1 Stand der techniek inzake invoerapparaten voor computers**

Al van het prille begin van de computer was er behoefte aan een mogelijkheid om commando's via een invoerapparaat (input device) in te geven. Een computer is immers gebouwd voor het uitvoeren van commando's van de gebruiker en dus moet de gebruiker in staat zijn deze commando's in te geven. Voor de rechtstreekse manuele invoer werden in het begin uitsluitend toetsenborden gebruikt, naar analogie met de mechanische schrijfmachine. Tegenwoordig bestaat er echter een brede waaier van invoerapparaten, zoals toetsenborden, muizen, digitaliseertabletten, scanners, spraakherkenningsprogramma's, enzovoort. Deze verschillende alternatieven worden hier kort besproken.

#### **1.1.1 Toetsenborden**

Het toetsenbord is zonder twijfel het meest gebruikte invoerapparaat voor een computer. Het biedt de mogelijkheid om een alfanumerieke waarde in te geven door op een toets te drukken. Het is een eenvoudig, goedkoop en intuïtief systeem, dat een onervaren gebruiker toelaat om direct aan de slag te gaan.

Het toetsenbord heeft echter ook zijn beperkingen. Om te beginnen is de invoer beperkt tot cijfers, letters en leestekens. Hierdoor is het maken van een grafische tekening omslachtig, aangezien alle coördinaten ingegeven moeten worden. Een bijkomende beperking is de grootte. Vooral voor draagbare toepassingen is het klassieke toetsenbord te groot en te log. Om de draagbaarheid te vergroten, zijn er verschillende varianten op het klassieke toetsenbord ontwikkeld. Een voor de hand liggende variant is het miniatuurtoetsenbord [1, 2, 3], waarbij de toetsen verkleind worden. Deze toetsenborden zijn echter minder handig in gebruik. Een ander variant is het opvouwbaar of oprolbaar toetsenbord [4, 3, 5], respectievelijk afgebeeld in figuur 1.1(a) en 1.1(b). Deze toetsenborden zijn klein tijdens het transport, maar hebben toch grote toetsen. Een zeer recente variant is het virtuele toetsenbord, ontwikkeld door het bedrijf VKB [6]. Dit virtueel toetsenbord, getoond in figuur 1.1(c), is gebaseerd op een laser die de lay-out van een toetsenbord op het tafelblad projecteert. Een infrarood meetsysteem meet de positie van de vingertoppen en registreert wanneer een vinger een virtuele toets aanraakt.



(a) Opvouwbaar toetsenbord van TARGUS STOWAWAY. [4]      (b) Oprolbaar toetsenbord van Logitech. [5]      (c) Virtueel toetsenbord van VKB [6].

Figuur 1.1: Toetsenborden voor mobiele toepassingen.

### 1.1.2 Muizen en trackballs

Een muis biedt de gebruiker de mogelijkheid om een beweging in een vlak door te geven aan de computer. Daarnaast is een muis voorzien van enkele knoppen om specifieke commando's, zoals bijvoorbeeld 'Selecteer', in te geven. Het werkingsprincipe van een klassieke muis is gebaseerd op het meten van de rotatie van een kogel, die over het bureau-oppervlak rolt wanneer de muis beweegt [7]. Een recente ontwikkeling zijn de optische muizen [5, 8, 9, 10], die gebaseerd zijn op een camera die zich onder aan de muis bevindt. Deze camera neemt beelden van het bureau-oppervlak. Door opeenvolgende beelden met elkaar te vergelijken, kan de translatie van het beeld berekend worden. De som van al deze translaties geeft de beweging van de muis.

De trackball vervult een vergelijkbare functie als de muis, namelijk het ingeven van een beweging in een vlak. De trackball werkt analoog aan de muis, alleen wordt de beweging rechtstreeks aan een bol doorgegeven in plaats van het apparaat te bewegen [7].

De muis en de trackball zijn voornamelijk geschikt voor grafische toepassingen. Men kan echter moeilijk nauwkeurige banen beschrijven, waardoor het ingeven van letters of cijfers niet eenvoudig is. Bovendien is een muis omwille van zijn grootte minder geschikt voor draagbare toepassingen.

### 1.1.3 Joysticks

De joystick heeft dezelfde functionaliteit als een muis, namelijk het ingeven van beweging in een vlak. Hij vereist echter van de gebruiker een rotatiebeweging in plaats van een translatiebeweging zoals bij de muis. Deze rotatie is een maat voor de snelheid van de cursor. Verder heeft een joystick net als de muis enkele knoppen om speciale commando's te laten uitvoeren.



Figuur 1.2: Geminiaturiseerde joystick voor draagbare toepassingen.

Joysticks zijn enkel bedoeld om te navigeren. Voor het ingeven van een tekst of tekeningen zijn ze niet geschikt. Geminiaturiseerde joysticks zijn beschikbaar voor draagbare toepassingen, zoals de laptop getoond in figuur 1.2.

### 1.1.4 Digitaliseertabletten

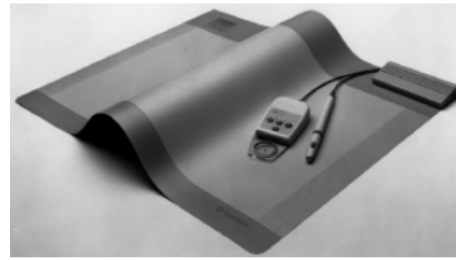
Digitaliseertabletten bestaan uit een pen of puck die over een speciale ondergrond beweegt. Deze ondergrond meet de positie van de pen of puck elektromagnetisch, elektrostatisch of resisitief [11]. Een variant van digitaliseertabletten zijn de aanraak-schermen (touchscreens), die een combinatie van een digitaliseertablet en een scherm vormen. Ze worden onder andere veel gebruikt in de zogenaamde Personal Digital Assistant (PDA).

Digitaliseertabletten meten de absolute coördinaten van de penpunt. Hierdoor zijn ze niet alleen uitermate geschikt voor grafische toepassingen, maar kunnen ze ook gebruikt worden om tekst in te geven.

Het voornaamste nadeel van digitaliseertabletten is hun grootte, aangezien een speciale schrijfpoppvlak steeds vereist is. Om ze voor draagbare toepassingen geschikt te maken, moeten de afmetingen van het schrijfpoppvlak beperkt worden, zoals bij de PDA in figuur 1.3(a) of het touchpad dat vaak bij labtops ingewerkt is. Een andere alternatief is het oprolbaar digitaliseertablet getoond in figuur 1.3(b).



(a) Mini-digitaliseertablet ingebouwd in een PDA van Palm [3].



(b) Oprolbaar digitaliseertablet van Numonics [12].

Figuur 1.3: Digitaliseertabletten voor mobiele toepassingen.

### 1.1.5 Spraakherkenning

Spraakherkenning is gebaseerd op het berekenen van de meest waarschijnlijke reeks van woorden uitgaande van een opgemeten audiosignaal. Daarbij wordt beroep gedaan op taalkundige modellen, die de kans op een bepaald woord berekenen rekening houdend met voorgaande woorden, en akoestische modellen, die de kans berekenen dat een bepaald woord dit audiosignaal geeft. De nauwkeurigheid waarmee een tekst herkend wordt, hangt van de toepassing [13] af. Voor eenvoudige toepassingen zoals het vervangen van druktoets-menu's wordt een nauwkeurigheid van 99.5% bereikt. Bij deze toepassing moet enkel een beperkte woordenschat (enkel losse cijfers) herkend worden. Voor meer complexe toepassingen zoals dicteren wordt - na het volgen van een leerprogramma - een herkenninggraad van 95% gehaald. Bij telefoongesprekken wordt slechts een nauwkeurigheid van 65% bereikt. Deze laatste toepassing heeft dan ook een hoge moeilijkheidsgraad daar er zoveel verschillende dialecten, accenten en manieren van uitspreken bestaan.

Toepassingen met spraakherkenning lijken makkelijk miniaturiseerbaar omdat enkel een microfoon en een processor vereist zijn. Deze toepassingen vereisen echter een krachtige processor om de complexe herkenning algoritmes uit te voeren. Deze krachtige processoren hebben nood aan een sterke voeding en een grote koeling, waardoor de miniaturisatie van het geheel beperkt is. Bovendien is spraakherkenning niet in alle omstandigheden te gebruiken. Bijvoorbeeld tijdens een vergadering of op een landschapsbureau is het niet mogelijk om iedereen gelijktijdig iets te laten inspreken in zijn agenda. Ook voor het ingeven van vertrouwelijke gegevens op openbare plaatsen is deze techniek niet geschikt.

### 1.1.6 Scanners

Ter volledigheid moeten ook scanners vermeld worden. Deze toestellen laten toe om een beeld in te voeren in de computer. Indien een gebruiker iets wil ingeven, kan hij dit



op een blad neerschrijven en nadien inscannen. De ingescande bitmap wordt vervolgens met behulp van een schriftherkenningsprogramma omgezet naar alfanumerieke tekens.

Er bestaan twee grote groepen van scanners, namelijk flat-bedscanners en doorvoerscanners. Bij de eerste groep wordt het te scannen beeld op een glasplaat gelegd en beweegt de optische scanner over het oppervlak. De huidige generatie flat-bedscanners voor thuisgebruik haalt een nauwkeurigheid van 2400dpi (dots per inch). De scan-oppervlakte is meestal A4 of groter, waardoor het typisch vaste apparaten zijn. Een tweede groep scanners zijn de doorvoerscanners, waarbij het papier voorbij een stilstaande scanner beweegt. Dit type scanner wordt onder andere gebruikt in fax-toestellen. Ook deze scanners zijn voor draagbare toepassingen te omvangrijk. Er bestaan wel handscanners die kleiner zijn, maar toch blijven ze onhandig voor draagbare toepassingen.

### 1.1.7 Overzicht

Er bestaat een ruim aanbod van invoerapparaten voor een computer. Tabel 1.1 geeft een overzicht van deze invoerapparaten met hun voornaamste eigenschappen.

Tabel 1.1: Overzicht van de stand der techniek inzake invoerapparaten.

	tekst	tekening	draagbare toepassingen
toetsenbord	ja	nee	matig
muis, trackball	nee	ja	matig
joystick	nee	matig	ja
digitaliseertablet	ja	ja	nee
spraakherkenning	ja	nee	matig
scanner	ja	ja	nee

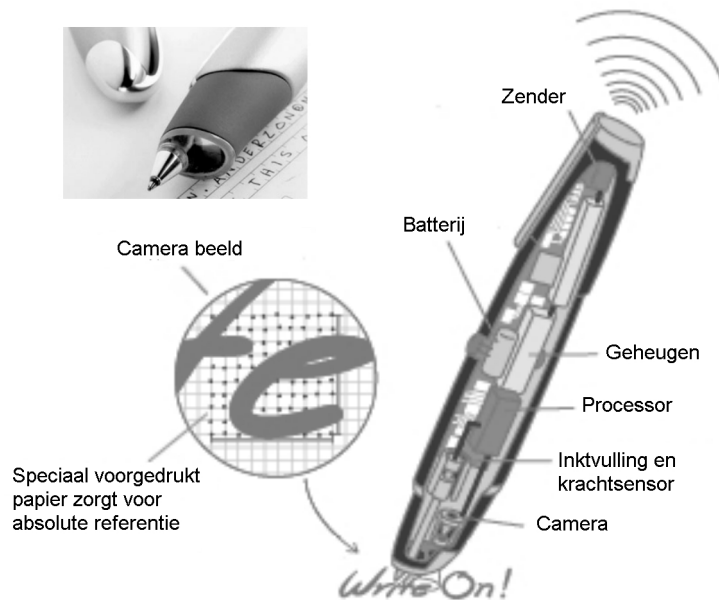
Uit tabel 1.1 blijkt dat er geen enkele bestaand invoerapparaat voor alle toepassingen geschikt is. Het ideale invoerapparaat, waarmee zowel tekst als tekeningen ingeven wordt en dat tevens klein genoeg is om voor draagbare toepassingen te dienen, bestaat niet. Het is deze lacune die men wil opvullen met de ontwikkeling van een intelligente computerpen. Deze pen moet te gebruiken zijn zoals een gewone pen, zonder een speciaal schrijfoppervlak. De detectie moet dus gebeuren vanuit de pen: ze moet als het ware intelligent worden.

Dit nieuwe invoerapparaat biedt tevens nieuwe toepassingsmogelijkheden. Naast een compact invoerapparaat voor computers, kan deze pen gebruikt worden in bijvoorbeeld GSM's of PDA's. Bovendien zijn deze intelligente pennen geschikt voor het verifiëren van handtekeningen. Hierbij gebruiken ze niet alleen het beeld van de handtekening, maar ook de informatie over de manier waarop de handtekening gemaakt is. Deze extra informatie, die ook de biometrie van een handtekening genoemd wordt, hangt sterk af van persoon tot persoon en is zeer moeilijk na te bootsen. Hierdoor biedt een intelligente computerpen een belangrijke meerwaarde aan de betrouwbaarheid van een handtekening.

## 1.2 Intelligente computerpennen

Ondanks alle mediabelangstelling voor deze intelligente computerpennen bestaat er nog altijd geen commercieel beschikbare 'volwaardige' computerpen. Verschillende bedrijven zijn echter volop bezig met het ontwikkelen van hun pen, met elk hun eigen gepatenteerd werkingsprincipe. De hier volgende bespreking van deze verschillende ontwikkelingen is enkel gebaseerd op de voorlopige informatie die de bedrijven zelf ter beschikking stellen. Informatie van een onafhankelijke partij is niet beschikbaar omdat de computerpennen nog niet verkrijgbaar zijn.

### 1.2.1 De Anoto pen



Figuur 1.4: Het werkingsprincipe van de Anoto pen [14].

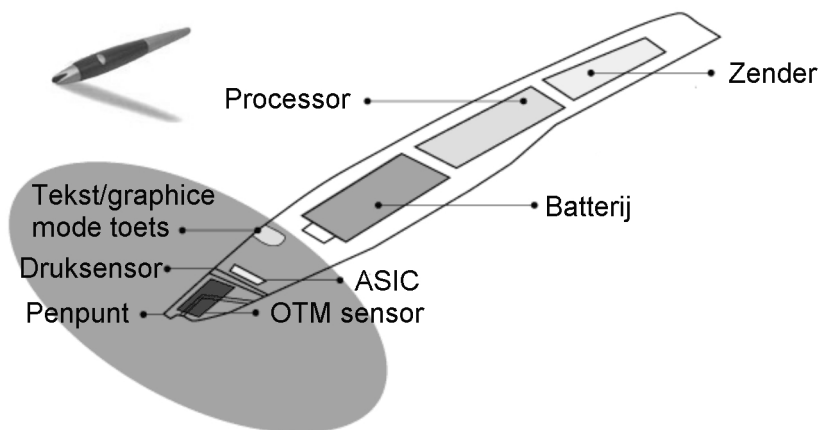
De Anoto pen [14], getoond in figuur 1.4, bepaalt zijn positie aan de hand van een camera die naast het inktpatroon zit. Deze camera maakt beelden van het papier, waarop een speciaal rooster van punten aangebracht is. Dit rooster vertoont fouten, die toelaten om de positie van de pen met een resolutie van 0.03mm te bepalen. Naast de camera is de pen ook voorzien van een druksensor, een inktvulling, een processor en een zender. De processor berekent uit de camerabeelden de positie van de penpunt. Na deze gegevens geëncrypteerd te hebben, wordt deze informatie doorgestuurd naar een computer of GSM met behulp van de zender. Het geheel wordt gevoed vanuit een oplaadbare batterij. Sony en Ericsson [15] gaan gezamenlijk een computerpen

(Chatpen CHA-30) op de markt brengen die deze technologie gebruikt.

Het speciaal gepatenteerde roosterpatroon heeft theoretisch een oppervlakte van 60 000 000 vierkante kilometer. Door bij verschillende invulformulieren telkens een ander deel van dit theoretisch mogelijke roosterpatroon te gebruiken, kan de pen automatisch het invulformulier herkennen. Een ander voordeel is de absolute positiebepaling, waardoor lange teksten of ingewikkelde tekeningen gemaakt kunnen worden. Correcties en aanvullingen blijven altijd mogelijk, zelfs na enkele dagen.

Er zijn echter ook beperkingen. De pen vereist speciaal papier met een roosterpatroon om de omgeving te structureren. Dit roosterpatroon moet aangemaakt worden door een printer met een resolutie van minstens 1000dpi. Bovendien moet er een speciale inktsoort op basis van koolstof gebruikt worden om het infrarode licht voldoende te absorberen. Hierdoor is de huidige generatie printers voor thuis- en kantoor toepassingen niet geschikt voor het aanmaken van dit gerasterd papier. Het papier moet dus steeds aangekocht worden.

### 1.2.2 De VPen van OTM Technologies



Figuur 1.5: Het werkingsprincipe van de VPen [16].

Figuur 1.5 toont de interne onderdelen van de VPen, ontwikkeld door OTM Technologies [16]. Deze pen is net als de Anoto pen gebaseerd op een camera en een druksensor in de pentip. Toch zijn er enkele wezenlijke verschillen. Waar de Anoto pen speciaal papier gebruikt om zijn omgeving te structureren, werkt deze pen in een niet-gestructureerde omgeving. De VPen heeft dus geen speciale ondergrond nodig: standaard wit papier volstaat. Zijn werkingsprincipe is vergelijkbaar met een optische muis. Door opeenvolgende beelden van de camera met elkaar te vergelijken wordt de relatieve verplaatsing van de penpunt berekend. De uiteindelijke positie is dan de som van deze relatieve verplaatsingen. Door deze sommatie stapelen meetfouten zich op, waardoor de autonomie van de pen beperkt is. Een tweede grote verschil is dat

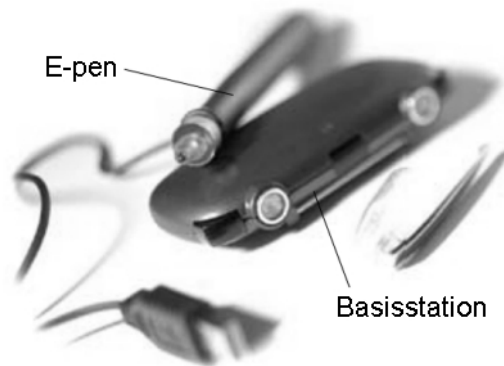
deze pen geen inktvulling heeft, waardoor enkel een elektronische versie van de tekst gemaakt wordt. Hierdoor is deze pen ongeschikt voor het invullen van formulieren waarvan ook een kopie beschikbaar moet zijn. Bovendien is er tijdens het schrijven geen visuele terugkoppeling naar de gebruiker.

### 1.2.3 De Compupen van Pen2Net

De Compupen van Pen2Net [17] bepaalt zijn positie op basis van camerabeelden. Ze werkt analoog aan de VPen: de translatie tussen opeenvolgende beelden van de camera wordt beschouwd als een maat voor de verplaatsing van de penpunt. Het grote verschil met de VPen is de aanwezigheid van een inktvulling, zodat deze pen ook op papier kan schrijven. Daar staat echter tegenover dat er geen druk- of krachtsensor voorzien is.

### 1.2.4 De E-pen

De E-Pen [18], getoond in figuur 1.6, is gebaseerd op vaste bakens. Aan de rand van het blad wordt een basisstation geplaatst, dat infrarode en ultrasone bakens uitzendt. De E-Pen ontvangt deze vaste bakens, zodat hij zijn positie met behulp van triangulatie absoluut kan bepalen. Deze techniek haalt een resolutie van 0.01mm en een nauwkeurigheid van 0.02mm. Het gebied waarin de pen functioneert, heeft de grootte van een A4-blad.



Figuur 1.6: De E-pen met zijn basisstation [18].

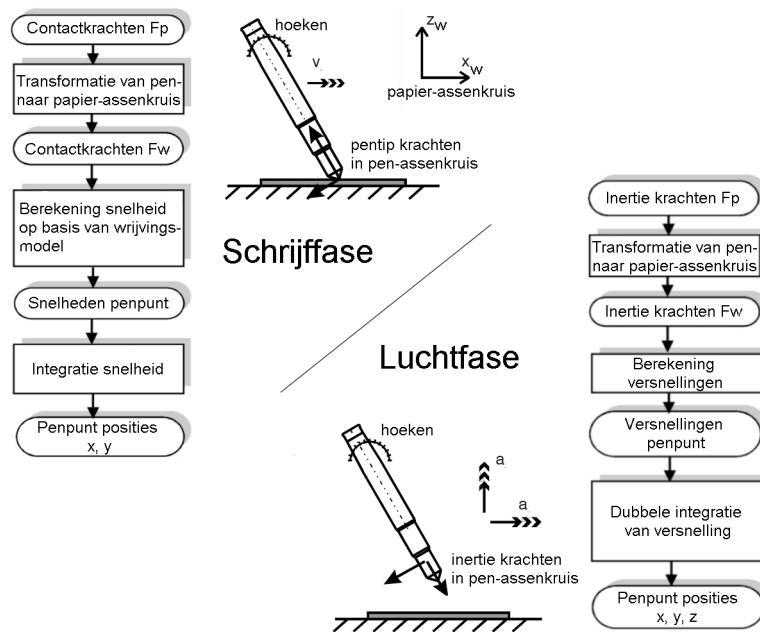
Aangezien deze pen zijn positie absoluut bepaalt, is zijn autonomie onbeperkt: correcties en aanvullingen blijven steeds mogelijk zolang de relatieve positie tussen basisstation en papier niet verandert. Als het papier verschuift ten opzichte van het basisstation, moet het beginpunt en oriëntatie van het papier terug ingegeven worden.

### 1.2.5 De SmartQuill van BT Technologies

De SmartQuill werd in 1998 door BT Technologies ontwikkeld [19, 20]. Zijn werking is gebaseerd op inertiële navigatie. In de pen zitten een aantal accelerometers, die de versnelling van de pen meten. Door een dubbele integratie van deze versnelling wordt de positie bekomen. BT Technologies is echter gestopt met dit onderzoek en heeft de rechten doorverkocht aan Microsoft.

### 1.2.6 De Smartpen

Figuur 1.7 toont het werkingsprincipe van de Smartpen [21, 22, 23, 24, 25]. De bepaling van de positie van de penpunt varieert naargelang de penpunt met het papier contact maakt (de schrijffase) of in de lucht beweegt (de luchtfase).



Figuur 1.7: Het werkingsprincipe van de SMARTPEN [24].

Tijdens de schrijffase meet een drie-assige krachtsensor vastgemaakt aan de penpunt de contactkrachten met het papier. Tegelijkertijd meet een hoeksensor de oriëntatie van de pen. Met behulp van de opgemeten oriëntatie, worden de contactkrachten - opgemeten in het pen-assenstelsel (vast aan de pen) - getransformeerd naar het papier-assenstelsel (vast aan het papier en de omgeving). Deze getransformeerde krachten vormen de ingang van het wrijvingsmodel, dat de snelheid van de penpunt berekent. Integratie van deze snelheid geeft de positie van de penpunt. Tijdens de luchtfase bestaan er geen contactkrachten tussen penpunt en papier. De pen bepaalt dan zijn

positie door de versnelling van de penpunt te meten. Hiervoor hangt aan de penpunt een massa, zodat de krachtsensor deze versnelling meet. Na transformatie naar het papier-assenstelsel, wordt deze versnelling twee maal geïntegreerd zodat de positie van de penpunt bekomen wordt.

De Smartpen vereist geen gestructureerde omgeving. Alle sensoren zitten in de pen, waardoor de Smartpen geschikt is voor draagbare toepassingen. Daartegenover staat de beperkte autonomie van de Smartpen omdat fouten zich ophopen door de enkele integratie tijdens de schrijffase of de dubbele integratie tijdens de luchtfase. De huidige generatie Smartpen is daarom enkel geschikt voor het verifiëren van handtekeningen. Het reconstrueren van tekst is (nog) niet mogelijk. De pen is wel reeds voorzien van een inktvulling.

### 1.2.7 Samenvatting

Tabel 1.2 geeft een overzicht van de verschillende concepten voor computerpennen, samen met hun voornaamste kenmerken. Een eerste belangrijk kenmerk is de mogelijkheid om de positie van de penpunt absoluut te bepalen. Hiervoor heeft een pen vaste bakens nodig om zijn omgeving te structureren. Wat betreft functionaliteit zijn deze pennen dus vergelijkbaar met een digitaliseertablet, alleen is het groot uitgevallen digitaliseertablet vervangen door een andere, kleinere vorm van een absoluut bakens. Dit bakens moet echter steeds met de pen meegenomen worden, zodat het geheel minder compact is. Dit nadeel bestaat niet voor pennen die werken in een niet-gestructureerde omgeving. Deze pennen zijn een op zich staand invoerapparaat, zonder externe bakens. Bij afwezigheid van deze externe bakens, gebeurt de positiebepaling aan de hand van het meten van relatieve bewegingen. De eigenlijke positie van de pen is de som van deze relatieve bewegingen. Deze sommatie zorgt voor een opeenstapeling van kleine fouten waardoor de onzekerheid op de positie in de tijd toeneemt en de autonomie van de pen beperkt is. Hun voornaamste toepassingsgebieden zijn GSM's, elektronische agenda's en PDA's.

Tabel 1.2: Overzicht van de stand van zaken in computerpennen.

	absolute positie	compact	inktvulling	handtekening-verificatie
De Anoto Pen	+	-	+	positie + druk
De VPen	-	+	-	positie + druk
De Compupen	-	+	+	positie
De E-pen	+	-	+	positie
De Smartquill	-	+		
De Smartpen	-	+	+	positie + 3D kracht

Een tweede belangrijk kenmerk is de aanwezigheid van een inktvulling. Deze inktvulling zorgt voor een visuele terugkoppeling tijdens het schrijven. Bovendien wordt hierdoor een afschrift van de ingegeven tekst gecreëerd, wat voor invulformulieren nuttig is. De aanwezigheid van een inktvulling zorgt echter voor extra plaatsbeperkingen, waardoor sommige fabrikanten hiervan afzien.

Tot slot verschillen computerpennen in de graad waarin ze geschikt zijn om handtekeningen te controleren. Sommige pennen registreren enkel de beweging van de penpunt, anderen bepalen ook de kracht op de penpunt. Het spreekt voor zich dat deze laatste pennen meer mogelijkheden hebben om echte van valse handtekeningen te onderscheiden.

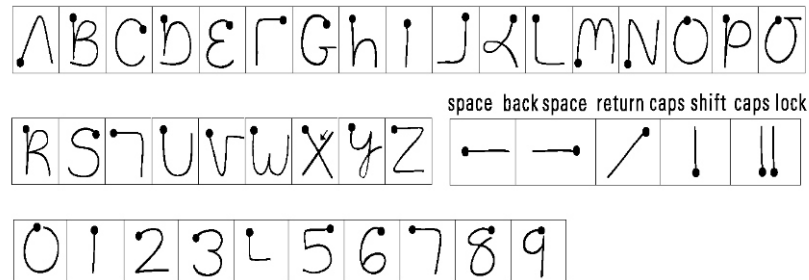
### 1.3 Doel van het doctoraat

De doelstelling van dit doctoraat is het ontwikkelen van een prototype van een intelligente computerpen, die in een niet-gestructureerde omgeving werkt. Aangezien in deze omgeving een absoluut bakent ontbreekt, is enkel een relatieve plaatsbepaling van de pen mogelijk. Bij deze relatieve plaatsbepaling stapelen meetfouten zich op, waardoor de pen slechts een beperkte autonomie heeft. De uitdaging van dit onderzoek ligt bijgevolg in het maximaliseren van deze beperkte autonomie.

Met betrekking tot de autonomie zijn vier niveaus vooropgesteld, waarbij telkens hogere eisen gesteld worden.

- ▷ Het eerste en eenvoudigste niveau reconstrueert enkel losse letters, die met één enkele pennentrek gemaakt zijn. Hiervoor is het Graffiti alfabet [3] ontwikkeld, getoond in figuur 1.8. De dikke stip geeft telkens het beginpunt van de pennentrek aan. De gereconstrueerde letters worden met een tekstherkenningsprogramma omgezet naar een ASCII-tekst. Dit tekstherkenningsprogramma haalt een hoge nauwkeurigheid [3]. De pennentrekken die de 26 letters of de 10 cijfers voorstellen verschillen immers sterk van elkaar, zodat zelfs bij een gebrekkige tekstreconstructie geen verwarring mogelijk is. Dit niveau vereist geen luchtfase: de spatie tussen twee woorden wordt door een horizontale streep aangegeven. De gebruiker moet echter wel de schrijfwijze van het Graffiti alfabet aanleren.
- ▷ Het tweede niveau reconstrueert losse letters en woorden in een natuurlijk handschrift, die met één pennentrek gemaakt zijn. Opdat het woord herkenbaar zou zijn, moet een pennentrek nauwkeurig gereconstrueerd worden. Een luchtfase is niet vereist.
- ▷ Het derde niveau reconstrueert een woord bestaande uit meerdere pennentrekken. De reconstructie van het streepje aan de t of het puntje op de i is ook mogelijk. Hiervoor is naast het nauwkeurig reconstrueren van een pennentrek ook het reconstrueren van een korte beweging in de lucht vereist.
- ▷ Het hoogste niveau reconstrueert een volledige tekst in een natuurlijk handschrift. Hiervoor is een onbeperkte autonomie van zowel de schrijf- als de luchtfase vereist. Zoals in paragraaf 1.2.7 reeds is aangehaald, is deze onbeperkte autonomie niet realiseerbaar in een niet-gestructureerde omgeving.

Er bestaan vier concepten voor een computerpen in een niet-gestructureerde omgeving: de VPen, de Compupen, de Smartquill en de Smartpen. Het Smartpen-concept biedt ten opzichte van de overige concepten meer mogelijkheden voor het verifiëren van handtekeningen. Het concept meet immers niet alleen de positie van de penpunt, maar ook de oriëntatie en de krachten op de penpunt. Bovendien is een inktvulling



Figuur 1.8: Het Graffiti alfabet [3].

voorzien waardoor de pen ook op papier schrijft. Op die manier heeft de gebruiker steeds een afschrift van hetgeen hij ingegeven heeft. Omwille van deze twee voordelen is in dit doctoraat geopteerd voor het Smartpen-concept.

De huidige Smartpen is enkel in staat om handtekeningen te verifiëren. Voor de uitbreiding naar tekstreconstructie zijn nauwkeurigere sensoren vereist. Bovendien moet een wrijvingsmodel van de penpunt op het papier experimenteel geïdentificeerd worden. Het eindresultaat van dit onderzoek is een prototype van een schrijvende computerpen, dat de maximale mogelijkheden van de huidige stand van de techniek benut binnen de budgettaire grenzen die realistisch zijn voor dit massaproduct. Het ontwikkelen van tekstherkenningssoftware behoort niet tot de doelstelling van dit doctoraat.

Bij het ontwikkelen van deze nieuwe computerpen kan men terugvallen op de ervaring die tijdens een voorgaand project opgebouwd is. Bijlage A geeft een kort overzicht van de resultaten van dit project.

## 1.4 Besluit

Bij het bekijken van het huidig aanbod van invoerapparaten blijkt een nood te bestaan aan een compacte mobiele invoerapparaat. Verscheidene fabrikanten zijn daarom bezig met de ontwikkeling van een intelligente computerpen. De verschillende concepten voor een computerpen zijn in twee groepen onder te verdelen. De eerste groep is gebaseerd op vaste bakens die de omgeving structureren. Hierdoor kunnen deze computerpennen hun positie absoluut bepalen. Deze absolute bepaling geeft hun onbeperkte autonomie, waardoor ze een grote functionaliteit hebben. Daartegenover staat dat vaste bakens bijkomende ruimte innemen, waardoor een deel van de compactheid en de draagbaarheid verloren gaat. De tweede groep van computerpennen werkt in een niet-gestructureerde omgeving. Deze computerpennen bepalen hun relatieve positie door middel van interne sensoren. De compactheid en draagbaarheid van deze computerpennen is dus maximaal. De relatieve positionering zorgt echter voor een beperkte autonomie, waardoor hun functionaliteit lager ligt.



Het doel van dit doctoraat is de ontwikkeling van een schrijvende computerpen in een niet-gestructureerde omgeving. Hiervoor wordt uitgegaan van het Smartpen-concept omdat dit concept meer mogelijkheden biedt voor het verifiëren van handtekeningen en omdat een inktvulling voorzien is. De nadruk van dit doctoraat ligt op het ontwikkelen van nieuwe, nauwkeurigere sensoren en het opstellen van een experimenteel gevalideerd wrijvingsmodel van de penpunt op papier.

*Op basis van dit hoofdstuk kunnen de grote delen van dit doctoraat afgebakend worden. Hoofdstuk 2 stelt de specificaties voor de verschillende sensoren op. Hoofdstuk 3 beschrijft het ontwerp van de oriëntatiesensor. Deze oriëntatiesensor bestaat uit een combinatie van een accelerometer die de richting van de zwaartekracht meet en een magnetische sensor die het aardmagnetisch veld meet. De nauwkeurigheid van de oriëntatiemeting is echter fundamenteel beperkt, waardoor de vereiste nauwkeurigheid voor het meten van de oriëntatie tijdens de luchtfase niet haalbaar is. Het uiteindelijke prototype zal hierdoor enkel de sensoren voor de schrijffase bevatten. Verder wordt in dit hoofdstuk een kalibratiestand ontworpen om deze nieuwe oriëntatiesensor te kalibreren. Hoofdstuk 4 bespreekt de ontwikkeling van twee drie-assige miniatuurkrachtsensoren. De eerste krachtsensor is gebaseerd op piëzo-elementen, die in één monolithisch geheel geïntegreerd zijn. De tweede krachtsensor bestaat uit een combinatie van een flexibele structuur met een optische verplaatsingsmeting. Hoofdstuk 5 behandelt het opstellen van het wrijvingsmodel. Hiervoor wordt een speciale tribometer ontwikkeld, die het wrijvingsgedrag tussen penpunt en papier meet. Met behulp van deze wrijvingsproeven wordt een nieuw wrijvingsmodel geïdentificeerd. Deze verbeteringen aan de hardware (de oriëntatiesensor en de krachtsensor) en de software (het wrijvingsmodel) resulteren in een nieuw prototype van de Smartpen, waarvan de assemblage en het testen besproken wordt in hoofdstuk 6. Schrijfproeven met dit prototype tonen aan dat de ontwikkelde computerpen in staat is om losse letters in het Graffiti handschrift te reconstrueren. Ook het reconstrueren van woorden die in één pennentrek met een natuurlijk handschrift geschreven zijn, is mogelijk.*



## Hoofdstuk 2

# Specificaties van een schrijvende computerpen

*De eerste stap in de ontwikkeling van een schrijvende computerpen is het opstellen van alle technische specificaties. Het begint met de algemene specificaties, die rechtstreeks uit de noden van de gebruiker volgen. Voorbeelden hiervan zijn een niet-gestructureerde omgeving, de volumebeperkingen en de prijs. Vervolgens wordt het meet- en frequentiebereik van alle sensoren gespecificeerd. Het hoofdstuk sluit af met het schatten van de vereiste nauwkeurigheid van alle sensoren.*

### 2.1 Definities

In dit hoofdstuk worden de volgende begrippen regelmatig gebruikt.

**een klassieke pen:** een pen die enkel op papier schrijft.

**een computerpen:** een intelligente pen, die zijn beweging meet en doorgeeft aan de computer voor het verifiëren van een handtekening of voor het reconstrueren van een tekst of een tekening.

**een schrijvende computerpen:** een intelligente pen, die speciaal ontworpen is om tekst te reconstrueren. Deze pen is uitgerust met een inktvulling zodat hij ook op papier schrijft.

**het pen-assenstelsel:** een bewegend assenstelsel vastgemaakt aan de pen. Hierbij ligt de z-as volgens de lengterichting van de pen.

**het papier-assenstelsel:** een assenstelsel, vastgemaakt aan het papier. De x- en y-as liggen in het vlak van het papier, met de x-as uitgelijnd ten opzichte van de schrijfrichting. De z-as staat loodrecht op het papier en is naar boven gericht.

## 2.2 Algemene specificaties

Centraal in het ontwerp van een schrijvende computerpen staat de analogie met een klassieke pen. Dit houdt in dat:

- een computerpen het uitzicht en de ergonomie van een klassieke pen heeft;
- ze overal en onmiddellijk bruikbaar is;
- ze degelijk aanvoelt;
- ze robuust is;
- ze goedkoop is.

Deze gebruikersnoden worden via de noden-specificatie-matrix in tabel 2.1 vertaald naar technische specificaties. In de rijen staan de noden van de klant en in de kolommen staan de technische specificaties.

Tabel 2.1: De noden-specificatie-matrix.

	vorm	afmetingen	hoge stijfheid	laag zwaartepunt	inktvulling	niet-gestruct. omgeving	temperatuurstabiliteit	bescherming overbelasting	kostprijs
uitzicht cf. pen	●	●							
ergonomie cf. pen	●	●	●	●					
aanvoelen degelijkheid	○	○	●	○					
op papier schrijven					●				
overal bruikbaar						●	○		
onmiddellijk bruikbaar						●	●		
robuustheid							○	●	
goedkoop									●

(● sterke afhankelijkheid, ○ lichte afhankelijkheid)

Deze technische specificaties worden vervolgens met concrete waarden ingevuld.

**vorm** De vorm van een computerpen hangt samen met het uitzicht, de ergonomie en het degelijk aanvoelen van een pen. De basisvorm van een klassieke pen is een omwentelingslichaam. Aan de penpunt is steeds een afschuining voorzien, zodat de penpunt tijdens het schrijven zichtbaar is. Aangezien het prototype van de ontwikkelde computerpen enkel de functionaliteit moet aantonen, wordt een cilinder als basisvorm gekozen. Een speciale vormgeving, zodat de vingers een betere grip krijgen, valt buiten dit werk.

**afmetingen** De buitendiameter van de cilinder is gespecificeerd op 14mm. Deze diameter komt overeen met de afmetingen van bijvoorbeeld een Mont Blanc pen

type 149. Rekening houdend met een wanddikte van 1mm, moeten alle componenten van de pen binnen een diameter van 12mm passen. De totale lengte is voorzien op 165mm.

**hoge stijfheid** De stijfheid hangt samen met de ergonomie en het aanvoelen van de degelijkheid. Indien de penpunt te flexibel opgehangen is ten opzichte van de penbehuizing (die de gebruiker vasthoudt), zal de penpunt niet dezelfde beweging maken als de penbehuizing. De verplaatsing van de penpunt ten opzichte van de plaats waar de vingers de penbehuizing vasthouden (=de grip voor de vingers) mag maximaal 0.1mm bedragen. Aangezien de maximale schrijfkrachten 2N bedragen (zie paragraaf 2.3.3), moet de stijfheid tussen penpunt en behuizing minimaal 20N/mm bedragen.

**laag zwaartepunt** Het zwaartepunt van een pen moet in de buurt liggen van de plaats waar de vingers de pen vasthouden. Op deze manier moeten de vingers minder kracht uitoefenen om de pen te bewegen.

**inktvulling** Het spreekt voor zich dat een computerpen over een inktvulling moet beschikken om op papier te schrijven. Deze inktvulling moet een hoge kwaliteit hebben. Een mogelijke inktvulling is de Rotring DIN16554 met een diameter van 2.2mm en een lengte van 65mm.

**niet-gestructureerde omgeving** Opdat een computerpen overal en onmiddellijk bruikbaar zou zijn, mogen er geen beperkingen op de omgeving en het werkvolume bestaan. Het plaatsen van bakens of andere kunstmatige referenties om de omgeving te structureren is bijgevolg niet gewenst: onze computerpen moet werken in een niet-gestructureerde omgeving.

**temperatuurstabiliteit** Een computerpen moet zowel in de winter als in de zomer bruikbaar zijn. Bovendien warmt een pen tijdens het schrijven op door de lichaamswarmte van de hand. Bijgevolg moeten de interne sensoren binnen een bereik van  $20 \pm 20^{\circ}\text{C}$  stabiel functioneren.

**bescherming tegen overbelasting** Een computerpen moet robuust zijn. De gebruiker aanziet deze computerpen immers niet als een fragiel meetinstrument, maar als een gebruiksgoed. Een val van lage hoogte kan bijvoorbeeld voorkomen. Alle sensoren moeten daarom voorzien zijn van noodstoppen, die de sensor tegen overbelasting beschermen.

**kostprijs** Een richtverkoopprijs in de detailhandel van 250€ is voorzien. Rekening houdend dat twee derde van deze prijs voor de distributie en detailhandel is, moet de kostprijs van een computerpen zeker onder 80€ liggen. De prijs per sensor is bijgevolg beperkt. Een richtwaarde van 10€ per sensor wordt initieel vooropgesteld.

Tabel 2.2 vat alle algemene specificaties samen.

Tabel 2.2: De algemene specificaties van een computerpen.

vorm	cilinder afschuining penpunt
afmetingen	
- buitendiameter	14mm
- binnendiameter	12mm
- lengte	165mm
stijfheid	<0.1mm uitbuiging bij maximale kracht of >20N/mm
zwaartepunt	bij grip vingers
inktvulling	vb. Rotring DIN16554 ( $\phi$ 2.2mm x 65mm)
omgeving	niet-gestructureerd
robuustheid	bescherming overbelasting
kostprijs per sensor	10€

## 2.3 Vereist meet- en frequentiebereik van alle sensoren

### 2.3.1 Inleiding

Het gekozen concept voor een schrijvende computerpen is besproken in paragraaf 1.2.6. Dit concept maakt gebruik van een krachtsensor, een oriëntatiesensor en een accelerometer. Om het vereiste meet- en frequentiebereik van deze sensoren te specificeren, moet de beweging van de pen en de contactkrachten tussen penpunt en papier tijdens het schrijven gemeten worden. De beweging van de pen omvat de versnelling van de penpunt, de oriëntatie van de pen en zijn afgeleiden (de hoeksnelheid en de hoekversnelling). Ook het meet- en frequentiebereik van de snelheid van de penpunt is belangrijk omdat de snelheid via het wrijvingsmodel berekend wordt.

In verband met het opmeten van de beweging en de contactkrachten tijdens het schrijven bestaan er drie studies:

- In een voorgaande project, zie Bijlage A, is het bereik van de accelerometer in de lucht bepaald door een één-assige accelerometer bovenaan de pen te bevestigen. Hierbij is de gevoelige as uitgelijnd met de lengterichting van de pen. Het bereik van de opgemeten versnellingen ligt voor 90% tussen  $\pm 3\text{m/s}^2$  en voor 99.5% tussen  $\pm 5\text{m/s}^2$ . Tevens is in dit project het bereik van de krachten op de penpunt bepaald door op een krachtplatform te schrijven. 90% van de opgemeten krachten viel tussen  $\pm 2\text{N}$  en 99.5% tussen  $\pm 5\text{N}$ . De maximaal vastgestelde tijdsafgeleide van de kracht was  $\pm 0.5\text{kN/s}$ .
- S. Steegen [26] bepaalde het bereik en het frequentiespectrum van de versnelling door middel van een één-assige accelerometer, die boven de grip voor de vingers gemonteerd was. De gevoelige as van de accelerometer stond hierbij loodrecht op de lengterichting van de pen. Een maximaal bereik van  $\pm 3\text{m/s}^2$

werd vastgesteld. Het frequentiespectrum ging van 0Hz tot 20Hz, met een piek rond 5Hz.

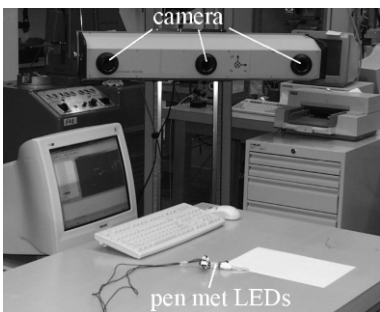
- D. Verduyn [27] bepaalde het bereik van de krachten door op een krachtplatform te schrijven. Deze experimenten gaven een bereik van  $\pm 2\text{N}$  voor de normaalkracht en  $\pm 0.6\text{N}$  voor de wrijvingskracht aan. Tevens werd het bereik van de snelheid van de penpunt tijdens de schrijffase bepaald door op een digitaliseer-tablet te schrijven. Het vastgestelde bereik was  $\pm 80\text{mm/s}$ .

Deze drie studies bepalen niet alle gewenste meet- en frequentiebereiken. Vooral de gegevens in verband met het meet- en frequentiebereik van de oriëntatie en zijn afgeleiden ontbreken. Bijgevolg is er een bijkomende studie nodig, die de volledige beweging van de pen opmeet. Daarnaast moeten de experimenten met het krachtplatform herhaald worden om het frequentiebereik van de contactkrachten te bepalen.

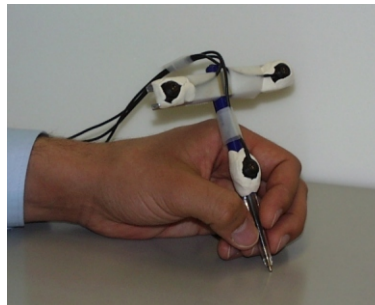
### 2.3.2 Opmeten van de penbeweging

#### Testopstelling

Om de beweging van de pen tijdens het schrijven te meten, wordt het Rodym-meetsysteem van Krypton [28] gebruikt. Dit meetsysteem, getoond in figuur 2.1(a), bestaat uit drie vast opgestelde camera's. Met behulp van triangulatie bepalen deze camera's de positie van een LED in de ruimte aan een bemonsteringsfrequentie van 200Hz. Om de positie en de oriëntatie van een voorwerp te meten, volstaan drie LEDs vastgemaakt aan dit voorwerp. Deze LEDs moeten in een driehoekige configuratie gemonteerd worden, zodat de afstand tussen de LEDs voldoende groot is om de oriëntatie nauwkeurig te berekenen uit de positie van de drie LEDs. Daarom is bovenaan de pen een T-stuk voorzien, zoals getoond in figuur 2.1(b). De gebruikte pen is een kogelpen, type Bic M10 clic™ Medium Blue.



(a) Het Rodym-meetsysteem van Krypton.

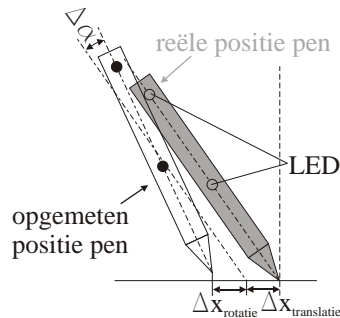


(b) Detail van de pen.

Figuur 2.1: De testopstelling voor het meten van de beweging van de pen.

De nauwkeurigheid van een positiemeting tijdens de proeven met het Rodym-meetsysteem is beperkt tot 0.15mm. Aangezien de LEDs op een afstand van 70mm

van elkaar liggen, geeft dit een nauwkeurigheid van  $0.2^\circ$  voor de oriëntatie. Zoals figuur 2.2 aantoont, is de fout op de positie van de penpunt gelijk aan de fout op de positie van de onderste LED vermeerderd met een positiefout veroorzaakt door een fout op de oriëntatie. Samen geeft dit een maximale fout van 0.45mm. Deze fout is vergelijkbaar met de lijndikte van de geschreven tekst, wat aanvaardbaar is.



Figuur 2.2: Meetnauwkeurigheid van positie van de penpunt.

### Snelheid en versnelling van de penpunt

Het experiment bestaat uit het schrijven van een kort stuk tekst, getoond in figuur 2.3(a). Het schrijftempo ligt hoog zodanig dat de snelheden en versnellingen maximaal zijn. Figuur 2.3(b) toont de gemeten positie van de penpunt. Voor de duidelijkheid is enkel de positie van de penpunt weergegeven wanneer deze dichter dan 1.5mm van het papier genaderd is. Deze figuur komt zeer goed overeen met de geschreven tekst die in figuur 2.3(a) getoond is.

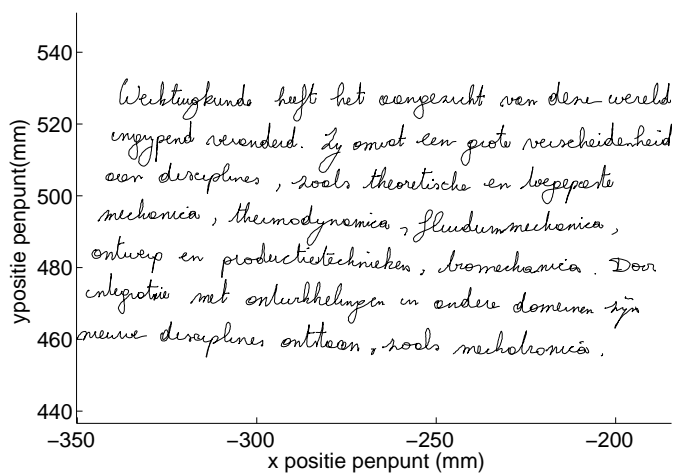
De snelheid van de penpunt wordt bekomen door respectievelijk de x-, y- en z-positie naar de tijd af te leiden. Figuur 2.4(a) toont de absolute waarde van de projectie van de totale snelheid op het vlak van het papier. Op zes pieken na, die optreden wanneer de gebruiker aan een nieuwe regel begint, beperkt de snelheid zich voornamelijk tot 0.17m/s. Deze grenswaarde ligt hoger dan de waarde bekomen door D. Verduyn [27]. De reden hiervoor is dat D. Verduyn enkel de snelheid tijdens de schrijffase beschouwde, terwijl hier de maximale snelheid van schrijf- en luchtfase beschouwd is (exclusief de zes pieken). Figuur 2.4(b) toont het frequentiespectrum van de snelheid. De voornaamste frequenties liggen tussen 0Hz en 20Hz. Boven 20Hz is geen significant signaal aanwezig.

Door de snelheid in x-, y- en z- richting af te leiden, wordt de versnelling van de penpunt bekomen. Omwille van numerieke stabiliteit is de hoogfrequente ruis eerst met een laagdoorlaat-filter (Butterworth, 1e orde, 40Hz) onderdrukt, alvorens de afleiding te maken. Figuur 2.5 toont de absolute waarde van de totale versnelling van de penpunt in functie van de tijd. Deze blijft voornamelijk beperkt tot  $4\text{m/s}^2$ . In een voorgaand project [21] en een vooronderzoek van S. Steegen [26] werd een iets lagere grens bekomen, namelijk  $3\text{m/s}^2$ . Het verschil is te verklaren doordat bij de voor-



Werktuigkunde heeft het aangezicht van deze wereld ingepend veranderd. Zy omvat een grote verscheidenheid aan disciplines, zoals theoretische en toegepaste mechanica, thermodynamica, fluidummechanica, ontwerp en productietechnieken, bromechanica. Door integratie met ontwikkelingen in andere domeinen zijn nieuwe disciplines ontstaan, zoals mechatronica.

(a) Origineel geschreven tekst op papier.



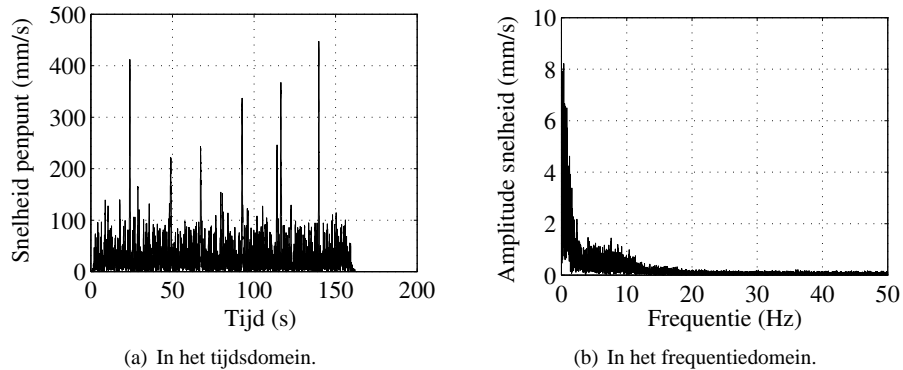
(b) Tekst opgemeten met het Rodym-meetsysteem.

Figuur 2.3: De tekst van de schrijfproef.

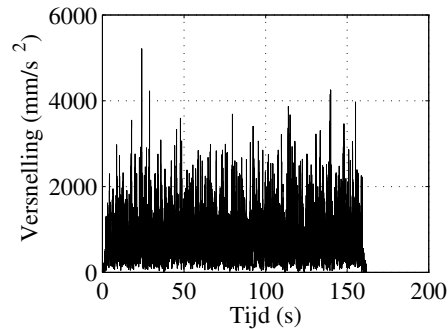
gaande onderzoeken de versnelling slechts in één richting tegelijk bepaald werd met behulp van een één-assige accelerometer, terwijl bovenstaand experiment rekening houdt met de totale versnelling. Bovendien werd de één-assige piëzo-accelerometer boven de penpunt vastgemaakt, waardoor niet de exacte versnelling van de penpunt gemeten werd.

### Oriëntatieveranderingen van de pen

Drie hoeken leggen de volledige oriëntatie van de pen vast. Er bestaan verschillende manieren om deze hoeken te definiëren. In deze tekst zijn de ZYZ-Eulerhoeken gebruikt omdat deze eenvoudig voor te stellen zijn. Figuur 2.6 toont deze conventie. De lengteas van de pen valt samen met de  $z^{\text{voorwerp}}$ -as. De azimuthhoek  $\varphi$  is de hoek rond een verticale, vergelijkbaar met de hoek die een kompas meet. De elevatiehoek  $\theta$  is de kanteling van de pen t.o.v. deze verticale en de spinhoek  $\psi$  is de rotatie rond



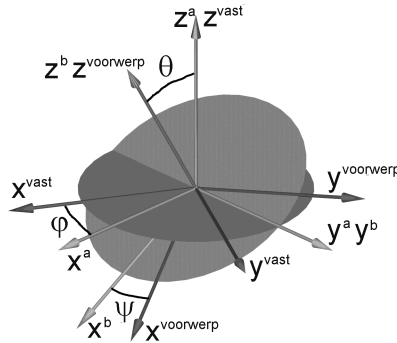
Figuur 2.4: De snelheid van de penpunt in het vlak van het papier.



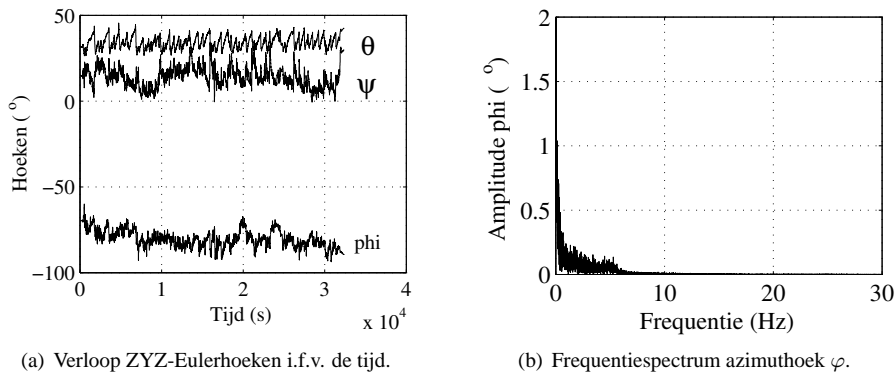
Figuur 2.5: Het verloop van de absolute totale versnelling i.f.v. de tijd.

de lengtes van de pen. Een meer gedetailleerde uitleg is te vinden in Bijlage B.

Voor het bepalen van deze drie hoeken tijdens het schrijven wordt de meetdata van bovenstaand experiment gebruikt. Figuur 2.7(a) toont het verloop van ZYZ-Eulerhoeken in functie van de tijd. Hieruit blijkt dat alle hoeken variëren. De azimuthhoek constant veronderstellen, zoals in een voorgaand project (Zie Bijlage A.) gebeurde, zorgt bijgevolg voor een aanzienlijke fout op de oriëntatiebepaling. De elevatiehoek  $\theta$  varieert rond een gemiddelde van  $36^\circ$ . Dit gemiddelde hangt echter sterk af van de lichaamsbouw en schrijfgewoonte van de gebruiker. Daarom wordt een ruime marge voor het bereik van deze hoek genomen, namelijk  $0^\circ \dots 50^\circ$ . De spinhoek  $\psi$  varieert bij dit experiment rond  $16^\circ$ . Deze waarde is echter willekeurig. De pen is immers een axi-symmetrisch voorwerp, waardoor de gebruiker de pen met een willekeurige spinhoek kan vastnemen. Het bereik van deze hoek is daarom de volledige  $360^\circ$ . Ook de azimuthhoek  $\varphi$  varieert veel breder dan dit experiment aangeeft. Het verschil tussen bijvoorbeeld een linkshandige of een rechtshandige persoon zal deze hoek  $180^\circ$  laten variëren. Het bereik van de azimuthhoek is daarom  $360^\circ$ .



Figuur 2.6: De ZYZ-Eulerhoeken.



(a) Verloop ZYZ-Eulerhoeken i.f.v. de tijd.

(b) Frequentiespectrum azimuthhoek  $\varphi$ .

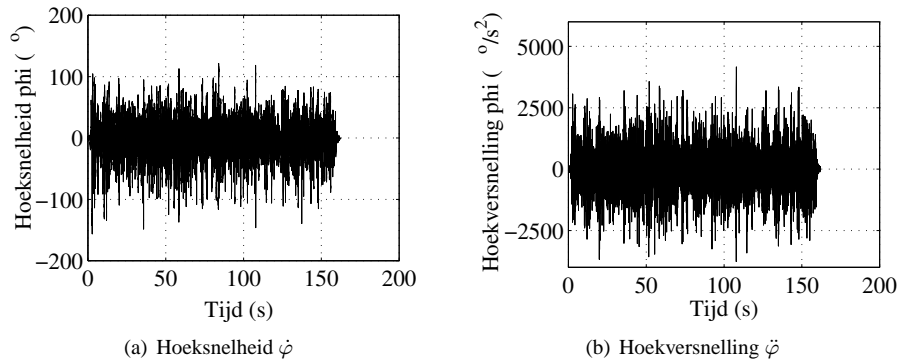
Figuur 2.7: De oriëntatie van de pen.

Figuur 2.7(b) toont het frequentiespectrum van de azimuthhoek  $\varphi$ . De andere twee hoeken, de elevatiehoek  $\theta$  en de spinhoek  $\psi$ , hebben een vergelijkbaar frequentiespectrum. Het frequentiebereik is kleiner dan bij de beweging van de penpunt: een bandbreedte van 10Hz volstaat.

De hoeksnelheden worden bekomen door de hoeken af te leiden. Figuur 2.8(a) toont de hoeksnelheid  $\dot{\varphi}$ . Hij varieert voornamelijk binnen  $\pm 100^\circ/s$  met een maximum van  $\pm 160^\circ/s$ . De hoeksnelheid  $\dot{\theta}$  varieert voornamelijk binnen  $\pm 60^\circ/s$ , met uitschieters tot  $\pm 90^\circ/s$ . De hoeksnelheid  $\dot{\psi}$  ligt tussen  $\pm 150^\circ/s$ .

Een gyroscoop, vastgemaakt aan de pen, meet echter niet  $\dot{\varphi}$ ,  $\dot{\theta}$  en  $\dot{\psi}$ , maar wel de hoeksnelheden  $\omega_x^{pen}$ ,  $\omega_y^{pen}$  en  $\omega_z^{pen}$  volgens het bewegend pen-assenstelsel. Tussen beide bestaat een verband dat in Bijlage C.3.1 afgeleid is. De hoeksnelheden  $\omega_x^{pen}$  en  $\omega_y^{pen}$  liggen voornamelijk tussen  $\pm 100^\circ/s$ . De hoeksnelheid  $\omega_z^{pen}$  is groter, namelijk  $\pm 150^\circ/s$ .

Door de tijdsafgeleide van de Eulerhoeken een tweede keer af te leiden worden



Figuur 2.8: De hoeksnelheid en hoekversnelling i.f.v. de tijd.

de hoekversnellingen bekomen. Net als bij de berekening van de versnelling van de penpunt is eerst een laagdoorlaatfilter toegepast om het afleiden numeriek stabiel te maken. Figuur 2.8(b) toont de hoekversnelling  $\ddot{\varphi}$ , die binnen  $\pm 3000^\circ/s^2$  varieert. Voor de hoekenversnellingen  $\dot{\theta}$  en  $\dot{\psi}$  zijn de grenzen respectievelijk  $\pm 1500^\circ/s^2$  en  $\pm 4000^\circ/s^2$ . Een hoekversnellingssensor meet echter de componenten volgens het bewegend pen-assenstelsel. De transformatie is analoog aan die voor de hoeksnelheid. Hierbij bekomt men voor  $\alpha_x^{pen}$  en  $\alpha_y^{pen}$  vergelijkbare grenzen, namelijk  $\pm 2000^\circ/s^2$ . De z-component van de hoekversnelling is groter, namelijk  $\pm 5000^\circ/s^2$ .

### 2.3.3 Opmeten van de contactkrachten tijdens het schrijven

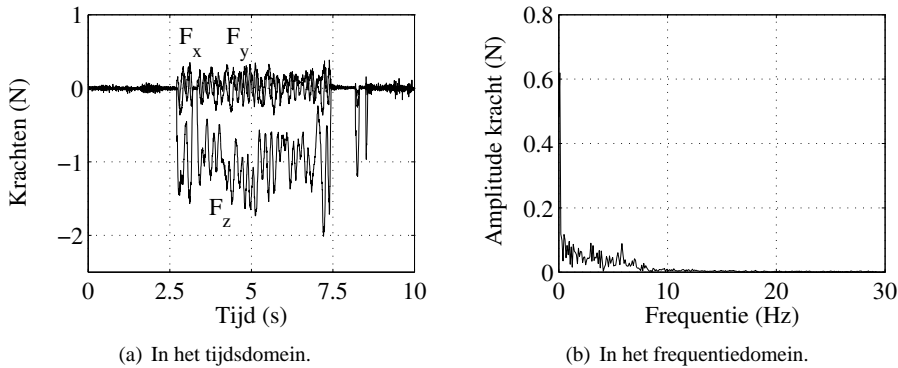
De contactkrachten worden gemeten met behulp van een piëzo-krachtplatform (Kistler 9559A). Op dit krachtplatform wordt een blad papier bevestigd, waarop met een kogelpen (type Bic M10 clic™ Medium Blue) een tekst geschreven wordt. Omdat bij quasi-statische metingen met piëzo-sensoren steeds drift optreedt, moet de tijdsduur van het experiment kort zijn. Daarom wordt slechts één woord geschreven, namelijk "Werktuigkunde". Dit woord bevat zowel rondingen (bijvoorbeeld bij de letters e en d) als scherpe richtingveranderingen (bijvoorbeeld bij de letters t, u). Bovendien bevat het woord de letters i en t, waardoor de contactkrachten bij het zetten van een puntje op de i of het maken van een streepje aan de t ook gemeten worden.

Figuur 2.9(a) toont het typisch verloop van de contactkrachten in het vast papier-assenstelsel. Eerst is er een groot blok waarbij het woord zelf geschreven wordt. Daarna volgen twee korte pieken, omwille van het streepje aan de t en het puntje op de i. De normaalkracht  $F_z^{papier}$  blijft steeds onder 2N. De wrijvingskrachten  $F_x^{papier}$  en  $F_y^{papier}$  zijn kleiner dan 0.4N. Deze grenzen stemmen overeen met de resultaten van een voorgaand project [21] en het werk van D. Verduyn [27].

Bovenstaande krachten zijn opgemeten in het vast papier-assenstelsel. Een krachtensensor, vastgemaakt aan de penpunt, meet echter de krachten in het bewegend pen-assenstelsel. De maximale normaalkracht van 2N zal bijgevolg op de drie assen van de krachtensensor geprojecteerd worden. Hierdoor moeten alle assen hetzelfde bereik

hebben, namelijk  $\pm 2N$ .

Figuur 2.9(b) toont het frequentiespectrum van de contactkrachten. Deze ligt tussen 0Hz en 20Hz, met de voornaamste frequenties onder 10Hz.



Figuur 2.9: De contactkrachten met het papier (in het papier-assenstelsel).

## 2.4 Vereiste nauwkeurigheid van alle sensoren

Naast het bepalen van het meet- en frequentiebereik van alle sensoren moet ook de vereiste nauwkeurigheid van elke sensor gespecificeerd worden. Zoals paragraaf 1.2.6 verduidelijkt, verschilt de gebruikte sensorconfiguratie echter naargelang de pen contact maakt met het papier (de schrijffase) of vrij in de lucht beweegt (de luchtfase). Daarom is het logisch om bij het schatten van de vereiste nauwkeurigheid dit onderscheid ook te maken.

### 2.4.1 Vereiste nauwkeurigheid tijdens de schrijffase

Tijdens de schrijffase wordt een kracht- en oriëntatiesensor gebruikt. De krachtsensor meet de contactkrachten met het papier. Deze krachten, opgemeten in het pen-assenstelsel, worden vervolgens getransformeerd naar het papier-assenstelsel. Op basis van deze getransformeerde krachten bepaalt het wrijvingsmodel daarna de snelheid. Enkelvoudige integratie van deze snelheid levert tenslotte de gevraagde positie van de penpunt. Om de vereiste nauwkeurigheid van de sensoren na te gaan, wordt in omgekeerde richting gewerkt. Eerst wordt de vereiste nauwkeurigheid van de krachtmeting in het papier-assenstelsel bepaald, waarna in een tweede stap de transformatie van assenstelsel in rekening gebracht wordt.

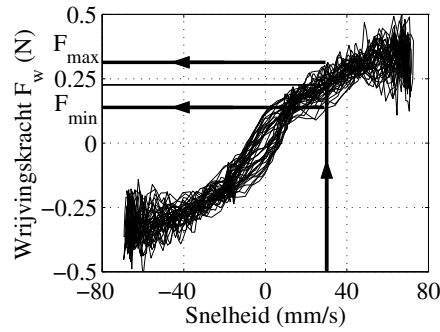
#### Vereiste nauwkeurigheid in het papier-assenstelsel

De vereiste nauwkeurigheid van de krachten in het papier-assenstelsel hangt samen met de spreiding op het verband tussen snelheid en wrijvingskracht. Dit verband,

getoond in figuur 2.10 is niet eenduidig. Voor een bepaalde snelheid varieert de wrijvingskracht tussen  $F_{min}$  en  $F_{max}$ . Hierbij is het verschil  $F_{max} - F_{min}$  ongeveer gelijk aan zes maal de spreiding op de wrijvingskracht. Bijgevolg geldt:

$$\sigma = \frac{F_{max} - F_{min}}{6} = 0.03N. \quad (2.1)$$

met  $\sigma$  de spreiding op de wrijvingskracht. Indien de wrijvingskracht met een nauwkeurigheid van 0.03N gemeten wordt ( $\sigma = 0.015N$ ), zal de foutbijdrage van de krachtmeting aan de totale fout op de snelheid de helft zijn van de foutbijdrage door de spreiding op het verband op de wrijvingskracht.



Figuur 2.10: Het kracht-snelheidsverband.

### Vereiste nauwkeurigheid in een bewegend assenstelsel

Om de nauwkeurigheid van de oriëntatiesensor en krachtsensor in het pen-assenstelsel te schatten, wordt het vereenvoudigde geval van een beweging in een vlak beschouwd. Hierbij is  $F_x^{papier}$  de wrijvingskracht en  $F_z^{papier}$  de normaalkracht, loodrecht op het papier. De transformatie is dan:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_z \end{bmatrix}_{papier} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_x \\ F_z \end{bmatrix}_{pen} \quad (2.2)$$

met  $\alpha$  de hoek tussen  $x^{papier} - as$  en  $x^{pen} - as$ . Veronderstel dat de fouten op  $\alpha$ ,  $F_x^{pen}$  en  $F_z^{pen}$  onafhankelijk van elkaar zijn. Stel bovendien dat  $\sigma_{F_x^{pen}} = \sigma_{F_z^{pen}} = \sigma_{F_i^{pen}}$ . Dan geldt:

$$\begin{aligned} \sigma_{F_x^{papier}}^2 &= \left(\frac{\delta f}{\delta \alpha}\right)^2 \sigma_\alpha^2 + \left(\frac{\delta f}{\delta F_x^{pen}}\right)^2 \sigma_{F_x^{pen}}^2 + \left(\frac{\delta f}{\delta F_z^{pen}}\right)^2 \sigma_{F_z^{pen}}^2 \\ &= (-\sin(\alpha)F_x^{pen} - \cos(\alpha)F_z^{pen})^2 \sigma_\alpha^2 + \cos^2(\alpha)\sigma_{F_x^{pen}}^2 + \sin^2(\alpha)\sigma_{F_z^{pen}}^2 \\ &= (-\sin(\alpha)F_x^{pen} - \cos(\alpha)F_z^{pen})^2 \sigma_\alpha^2 + \sigma_{F_i^{pen}}^2 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Deze functie is maximaal indien  $\alpha$  gelijk is aan  $45^\circ$ . Met een gemiddelde kracht van 1N geeft dit dan:

$$\sigma_{F_x^{papier}}^2 = 2\sigma_\alpha^2 + \sigma_{F_i^{pen}}^2 \quad (2.4)$$

Indien de krachtensor een nauwkeurigheid van 0.02N ( $\sigma_{F^{pen}} = 0.01N$ ) heeft en de oriëntatiesensor een nauwkeurigheid van  $1^\circ$  ( $\sigma_\alpha = 0.5^\circ$ ) heeft dan is de spreiding op  $F_x^{papier}$  gelijk aan 0.016N. Voor  $\sigma_{F_z^{papier}}^2$  wordt een analoge formule bekomen.

De bovenstaande schatting van de vereiste nauwkeurigheid is geldig voor een beweging in een vlak. De extrapolatie van deze schatting naar een drie dimensionale ruimte is mogelijk door een verticaal raakvlak aan de beweging te beschouwen. De totale wrijvingskracht en de normaalkracht liggen in dit raakvlak, waardoor bovenstaande afleiding bij benadering blijft gelden. De vereiste nauwkeurigheid van de krachtensor is dus 0.02N. Voor een oriëntatiemeting geldt een nauwkeurigheid van  $1^\circ$ . Merk op dat deze nauwkeurigheid enkel geldt voor de elevatiehoek  $\theta$  en de spinhoek  $\psi$ . Voor de azimuthhoek  $\varphi$  volstaat een lagere nauwkeurigheid. Een fout op de azimuthhoek zorgt immers enkel voor een rotatie van de tekst. Figuur 2.11 toont een woord na een rotatie met verschillende hoeken. Zelfs bij een rotatie van  $5^\circ$  blijft de tekst leesbaar. Voor de azimuthhoek volstaat bijgevolg een nauwkeurigheid van  $5^\circ$ .

werktuigkunde	origineel
werktuigkunde	$1^\circ$ rotatie
werktuigkunde	$3^\circ$ rotatie
werktuigkunde	$5^\circ$ rotatie

Figuur 2.11: Rotatie tekst door fout op azimuthhoek.

### 2.4.2 Vereiste nauwkeurigheid tijdens de luchtfase

Tijdens de luchtfase wordt de positie met behulp van een accelerometer en een oriëntatiesensor bepaald. Hierbij meet de accelerometer de versnellingen in het pen-assenstelsel. Deze versnellingen worden, na transformatie naar het papier-assenstelsel, dubbel geïntegreerd om de positie te bekomen. Voor het bepalen van de nauwkeurigheid wordt in omgekeerde volgorde gewerkt. Eerst is de dubbele integratie bestudeerd, waaruit de vereiste nauwkeurigheid van de versnelling in het papier-assenstelsel geschat is. Vervolgens is de transformatie van het assenstelsel in rekening gebracht om de nauwkeurigheid van de oriëntatiesensor en accelerometer te schatten.

#### Vereiste nauwkeurigheid in een vast assenstelsel

Door de dubbele integratie is de foutenbijdrage van een systematische fout veel belangrijker dan die van een toevallige fout. Daarom wordt enkel de foutenvoorplanting van een systematische fout (offset) nagegaan. Een offset op de versnelling geeft door

de dubbele integratie aanleiding tot een sterk toenemende fout op de positie. Deze positiefout moet voor een goede schrifreconstructie beperkt blijven tot 1mm. Dit komt overeen met twee keer de lijndikte.

Neem het eenvoudige geval van een constante offset op de versnelling. Door de dubbele integratie geeft deze aanleiding tot een sterk toenemende drift volgens:

$$\begin{aligned}
 \Delta x_n &= \sum_{k=1}^n \Delta v_k \Delta t \\
 &= \sum_{k=1}^n \left( \sum_{j=1}^k (\Delta a_j \Delta t) \right) \Delta t \\
 &= \Delta t^2 \sum_{k=1}^n \left( \sum_{j=1}^k \Delta a_j \right) \\
 &= \Delta t^2 (n + (n-1) + \dots + 1) \Delta a \\
 &= \Delta t^2 \frac{1}{2} (n^2 + n) \Delta a
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

met  $n$  het aantal opgemeten punten,  $\Delta v_k$  de offset op de snelheid op het moment  $k$ ,  $\Delta a_j$  de offset op de versnelling op het moment  $j$ . Formule (2.5) toont aan dat de drift kwadratisch in de tijd toeneemt. De haalbare nauwkeurigheid van de positiebepaling hangt bijgevolg sterk af van de integratietijd.

In verband met de integratietijd zijn er verschillende niveaus van autonomie gedefinieerd in paragraaf 1.3. Voor de luchtfase zijn twee niveaus van autonomie relevant.

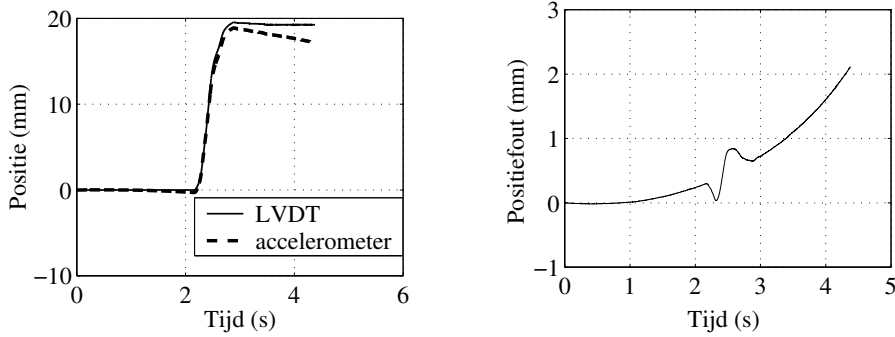
- Het vierde niveau, waarbij de computerpen een onbeperkte autonomie heeft, veronderstelt een zeer lange (oneindige) integratietijd. Met behulp van formule (2.5) kan eenvoudig aangetoond worden dat dit onrealistisch is. Neem een integratietijd van vijf seconden. De offset op de versnelling mag dan maximaal  $0.08\text{mm/s}^2$  bedragen om de specificatie van 1mm te halen. Op een bereik van  $4\text{m/s}^2$  is dit een relatieve nauwkeurigheid van 0.002%. Deze nauwkeurigheid kan niet gehaald worden door een accelerometer die slechts 10€ mag kosten.
- Het derde niveau gebruikt enkel een korte luchtfase tussen twee pennentrekken, waardoor de integratietijd kort is. Neem bijvoorbeeld een integratietijd van 0.5s. De vereiste nauwkeurigheid is dan gelijk aan  $8\text{mm/s}^2$  of 0.2% van het bereik.

Deze theoretische beschouwingen worden experimenteel bevestigd door G. Geyzen en B. Cosemans [29]. Hun testopstelling bestaat uit een hoogwaardige servo-accelerometer (Sundstrand model 2180, nauwkeurigheid 0.05%, bereik  $\pm 10\text{m/s}^2$ ) die op een slede gemonteerd is. Deze slede garandeert een lineaire, horizontale beweging van de accelerometer. De absolute positie van de slede wordt met behulp van een LVDT gemeten en vergeleken met de, uit de acceleraties berekende, positie. Figuur 2.12(a) toont de opgemeten en de berekende positie tijdens een kort experiment, waarbij de slede 19mm verplaatst. Figuur 2.12(b) toont het verschil tussen beide posities. Dit verschil neemt sterk toe in de tijd, waardoor een nauwkeurigheid van 1mm na 5s niet haalbaar is. Een integratietijd van 0.5s is wel haalbaar.

### Vereiste nauwkeurigheid in een bewegend assenstelsel

Voor het schatten van de vereiste nauwkeurigheid van accelerometer en oriëntatiesensor, wordt het vereenvoudigde geval van een beweging in een vlak beschouwd. Hierbij ligt de x-as van het vast papier-assenstelsel horizontaal en de z-as verticaal. Het pen-assenstelsel maakt een hoek  $\alpha$  met het vast papier-assenkruis. Tevens vallen





(a) Positie gemeten met LVDT en berekend met accelerometer.

(b) De fout tussen LVDT en accelerometer.

Figuur 2.12: Positiebepaling met accelerometer.

de oorsprongen van beide assenstelsels samen. Stel dat de accelerometer met een versnelling  $(a_x, a_z)_{papier}$  beweegt. De accelerometer meet naast deze versnelling ook de zwaartekracht  $g$ . Dit resulteert in de versnellingen  $a_{x,gemeten}^{pen}$  en  $a_{z,gemeten}^{pen}$  in het pen-assenstelsel volgens:

$$\begin{bmatrix} a_{x,gemeten}^{pen} \\ a_{z,gemeten}^{pen} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_x^{papier} \\ a_z^{papier} - g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta a_x^{pen} \\ \Delta a_z^{pen} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

met  $\Delta a_x^{pen}$  en  $\Delta a_z^{pen}$  de offset op de versnelling volgens respectievelijk de x-as en z-as. Indien op de oriëntatiemeting een offset  $\Delta \alpha$  zit, zullen deze versnellingen in het pen-assenstelsel getransformeerd worden naar:

$$\begin{bmatrix} a_{x,gemeten}^{papier} \\ a_{z,gemeten}^{papier} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha + \Delta \alpha) & -\sin(\alpha + \Delta \alpha) \\ \sin(\alpha + \Delta \alpha) & \cos(\alpha + \Delta \alpha) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{x,gemeten}^{pen} \\ a_{z,gemeten}^{pen} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Door (2.6) in (2.7) te substitueren bekomt men voor de horizontale versnelling:

$$\begin{aligned} a_{x,gemeten}^{papier} &= \cos(\Delta \alpha) a_x^{papier} - \sin(\Delta \alpha) (a_y^{papier} - g) \\ &\quad + \cos(\alpha + \Delta \alpha) \Delta a_x^{pen} - \sin(\alpha + \Delta \alpha) \Delta a_y^{pen} \\ &\approx a_x^{papier} - \Delta \alpha (a_y^{papier} - g) + \cos(\alpha) \Delta a_x^{pen} + \sin(\alpha) \Delta a_y^{pen} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Indien het verschil tussen  $a_{x,gemeten}^{papier}$  en  $a_x^{papier}$  beperkt moet blijven tot  $8 \text{ mm/s}^2$ , moet de offset op de oriëntatie kleiner zijn dan  $0.02^\circ$  en de offset op de versnelling kleiner dan  $6 \text{ mm/s}^2$ . In de thesis van B. Cosemans en G. Geysen [29] wordt de maximale fout op de oriëntatie met behulp van een 3D model berekend. Ze komen tot vergelijkbare resultaten. Merk op dat deze nauwkeurigheid enkel geldt voor  $\theta$  en  $\psi$ . Voor de azimuthoek  $\varphi$  volstaat immers een nauwkeurigheid van  $5^\circ$ .

## 2.5 Besluit

De eerste stap in de ontwikkeling van een schrijvende computerpen is het opstellen van de specificaties. Om te beginnen moet deze computerpen zijn beweging in een niet-gestructureerde omgeving met behulp van interne sensoren meten. Het gekozen concept is gebaseerd op een krachtsensor, een oriëntatiesensor en een accelerometer. Deze sensoren zijn in een penbehuizing geïntegreerd. Deze behuizing heeft de vorm van een cilinder met een diameter van 14mm en een lengte van 165mm. Aan de penpunt is deze cilinder van een afschuining voorzien, zodat tijdens het schrijven de penpunt steeds zichtbaar is. Bovendien moet het zwaartepunt zich ter hoogte van de grip voor de vingers bevinden. Voor de drie sensoren zijn de volgende specificaties opgesteld.

**De krachtsensor** De krachtsensor meet de contactkrachten tussen penpunt en papier in drie richtingen. Elke as heeft een meetbereik van  $\pm 2\text{N}$ . Het frequentiebereik gaat van 0Hz tot 20Hz. Een nauwkeurigheid van 1% of 0.02N is vereist. De sensor moet in een cilindrisch volume passen met een maximale diameter van 12mm. In de pentip moet plaats voorzien zijn voor een inktvulling. Een mogelijke inktvulling is de kogelpen van Rotring, type DIN16554. Deze inktvulling heeft een diameter van 2.2mm en een lengte van 65mm. Tot slot vereist de krachtsensor een minimale stijfheid van 20N/mm.

**De oriëntatiesensor** De oriëntatiesensor meet de volledige oriëntatie van de pen, voorgesteld door drie ZYZ-Eulerhoeken. De elevatiehoek ligt tussen  $0^\circ \dots 50^\circ$ , terwijl de azimuthhoek en de spinhoek de volledige  $360^\circ$  overspannen. Een frequentiebereik van 0Hz tot 10Hz volstaat. De vereiste nauwkeurigheid van de elevatiehoek  $\theta$  en de spinhoek  $\psi$  varieert naargelang de schrijf- of luchtfase. Voor de schrijffase volstaat een nauwkeurigheid van  $1^\circ$ , terwijl voor de luchtfase een nauwkeurigheid van  $0.02^\circ$  vereist is. De vereiste nauwkeurigheid van de azimuthhoek  $\varphi$  bedraagt  $5^\circ$ . De afmetingen van de oriëntatiesensor zijn beperkt tot een cilinder met een diameter van 12mm en een lengte van 10mm.

**De accelerometer** De accelerometer meet de versnellingen in drie richtingen. Het vereiste meetbereik bedraagt  $\pm 4\text{m/s}^2$ . De frequentiebereik gaat van 0Hz tot 20Hz. De vereiste nauwkeurigheid bedraagt  $6\text{mm/s}^2$ . De afmetingen van de accelerometer zijn beperkt tot een cilinder met een diameter van 12mm en een lengte van 10mm.

Naast deze individuele specificaties bestaan er ook enkele algemene specificaties. Alle sensoren moeten van noodstoppen voorzien zijn om ze tegen een val van lage hoogte te beschermen. Verder moeten ze binnen een temperatuurbereik van  $20^\circ \pm 20^\circ\text{C}$  stabiel zijn. Tot slot mag de kostprijs per sensor maximaal 10€ bedragen.

## Hoofdstuk 3

# Oriëntatiesensor

*De oriëntatiesensor meet de oriëntatie van een computerpen ten opzichte van het papier, dat impliciet in een horizontaal vlak verondersteld wordt. Deze oriëntatie wordt voorgesteld door drie ZYZ-Eulerhoeken: de azimuthhoek  $\varphi$ , de elevatiehoek  $\theta$  en de spinhoek  $\psi$ . Dit hoofdstuk beschrijft het ontwerp van deze oriëntatiesensor. Paragraaf 3.1 somt zijn specificaties op. Vervolgens geeft paragraaf 3.2 een overzicht van de principes voor het meten van de oriëntatie van een voorwerp in een niet-gestructureerde omgeving. Daarna wordt een prototype, bestaande uit een combinatie van een accelerometer en een magnetische sensor, uitgewerkt in paragraaf 3.3. Tot slot bespreekt paragraaf 3.4 de kalibratie van het prototype.*

### 3.1 Specificaties

Tabel 3.1 geeft een overzicht van de specificaties van de oriëntatiesensor in deze computerpen. De verantwoording van deze specificaties is terug te vinden in hoofdstuk 2.

Tabel 3.1: Specificaties van de oriëntatiesensor.

bereik		afmetingen	
- de azimuthhoek $\varphi$	$-180^\circ \dots 180^\circ$	- max. diameter	12mm
- de elevatiehoek $\theta$	$0^\circ \dots 50^\circ$	- max. lengte	10mm
- de spinhoek $\psi$	$-180^\circ \dots 180^\circ$		
nauwkeurigheid $\varphi$	$5^\circ$	niet-gestructureerde omgeving met	
nauwkeurigheid $\theta, \psi$		- temperatuurvariatie	$20 \pm 20^\circ C$
- schrijffase	$1^\circ$	- schokken	
- luchtfase	$0.02^\circ$		
frequentiebereik	0...10Hz	richtprijs	10€

## 3.2 Oriëntatiemeetprincipes in een niet-gestructureerde omgeving

In een niet-gestructureerde omgeving bestaan er geen kunstmatige vaste bakens. Het rechtstreeks meten van de oriëntatie kan enkel gebeuren met behulp van natuurlijke, absolute referenties. Hiervoor komen enkel de zwaartekracht en het aardmagnetisch veld in aanmerking. Deze meetprincipes worden respectievelijk in paragrafen 3.2.1 en 3.2.2 uitgewerkt. Daarnaast kan de oriëntatie ook onrechtstreeks bepaald worden door de enkelvoudige integratie van de hoeksnelheid of de dubbele integratie van de hoekversnelling. Deze meetprincipes zijn respectievelijk in paragrafen 3.2.3 en 3.2.4 besproken.

### 3.2.1 Rechtstreekse oriëntatiemeting op basis van het zwaartekrachtsveld

#### a. Principe

De zwaartekracht vormt een natuurlijke, absolute referentie, die steeds de verticale richting aangeeft. Met deze referentie kunnen de elevatiehoek  $\theta$  en de spinhoek  $\psi$  bepaald worden. De azimuthhoek  $\varphi$  is echter niet observeerbaar door een sensor vastgemaakt aan het voorwerp. Dit is eenvoudig aan te tonen door de projectie  $[a_x \ a_y \ a_z]_{\text{voorwerp}}^T$  van de zwaartekracht  $\vec{g}$  op het bewegende voorwerp-assenstelsel te analyseren. Hiervoor geldt:

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}_{\text{voorwerp}} = R_{ZYZEuler}^T \vec{g} = -g \begin{bmatrix} -s_\theta c_\psi \\ s_\theta s_\psi \\ c_\theta \end{bmatrix}, \quad (3.1)$$

waarbij  $c$  staat voor cosinus en  $s$  voor sinus. De projectie  $[a_x \ a_y \ a_z]_{\text{voorwerp}}^T$  is enkel afhankelijk van de hoeken  $\theta$  en  $\psi$ . De azimuthhoek  $\varphi$  komt niet voor in vergelijking (3.1) en is dus niet observeerbaar door een sensor vastgemaakt aan het voorwerp.

Om de richting van de zwaartekracht te meten en op basis daarvan  $\theta$  en  $\psi$  te bepalen, bestaan er twee alternatieven. Het eerste alternatief creëert met behulp van de zwaartekracht een horizontale of een verticale referentie. De oriëntatie van het voorwerp is dan rechtstreeks ten opzichte van deze referentie te bepalen. Voorbeelden zijn een waterpas en een schietlood. Bij het tweede alternatief wordt de projectie van de zwaartekracht  $\vec{g}$  op het voorwerp-assenstelsel gemeten met een DC-accelerometer. De elevatiehoek  $\theta$  en de spinhoek  $\psi$  zijn dan te berekenen met:

$$\theta = \text{bgtg}\left(\frac{-\sqrt{(a_x^{\text{voorwerp}})^2 + (a_y^{\text{voorwerp}})^2}}{a_z^{\text{voorwerp}}}\right), \quad (3.2)$$

$$\psi = \text{bgtg}\left(\frac{-a_y^{\text{voorwerp}}}{a_x^{\text{voorwerp}}}\right). \quad (3.3)$$

De afleiding van deze formules is te vinden in Bijlage C.1.1. De hoeken kunnen ook met een twee-assige accelerometer bepaald worden, die enkel de projecties  $a_x$  en  $a_y$

meet. De formule voor de spinhoek  $\psi$  blijft dezelfde, maar voor de elevatiehoek  $\theta$  geldt dan:

$$\theta = \text{bgsin}\left(\frac{\sqrt{(a_x^{\text{voorwerp}})^2 + (a_y^{\text{voorwerp}})^2}}{g}\right). \quad (3.4)$$

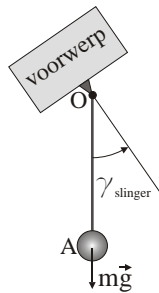
Hieruit volgt dat bij een twee-assige sensor de gevoeligheid van de elevatiehoek  $\theta$  daalt als  $\theta$  toeneemt. Bij  $\theta = 90^\circ$  is de twee-assige accelerometer zelfs ongevoelig voor een kleine hoekverandering van  $\theta$ . Een drie-assige accelerometer heeft dit nadeel niet.

### b. Sensoren

Slingers, vloeistof-oriëntatiesensoren en accelerometers zijn in staat om de richting van de zwaartekracht te meten. Hierbij creëren slingers en vloeistof-oriëntatiesensoren respectievelijk een verticale en een horizontale referentie, terwijl accelerometers de projectie van de zwaartekracht op het voorwerp-assenstelsel meten.

#### Slingers

Slingers zijn gebaseerd op een massa die aan een touw of een scharnierende staaf hangt (figuur 3.1). Zolang het zwaartepunt niet onder het scharnierpunt ligt, introduceert het gewicht  $m\vec{g}$  een moment  $\vec{OA} \wedge m\vec{g}$  rond het scharnier, waardoor de staaf roteert. In rust ligt het zwaartepunt van de massa onder het scharnierpunt en hangt de staaf verticaal. De hoek  $\gamma_{\text{slinger}}$  geeft dan de oriëntatie van het voorwerp. Deze hoek kan bijvoorbeeld opgemeten worden door een potentiometer in het scharnierpunt O te integreren.



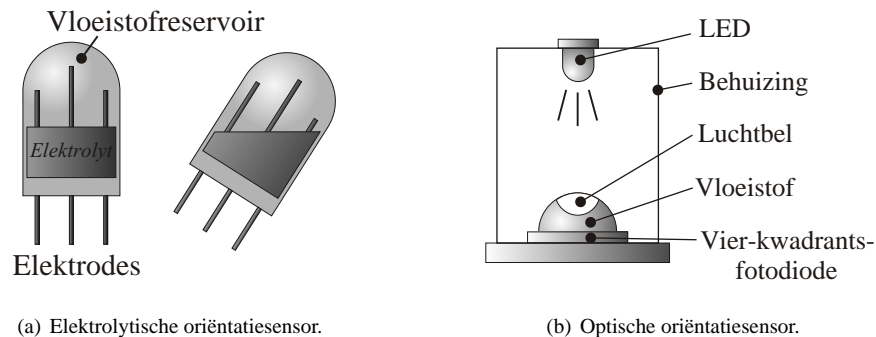
Figuur 3.1: Principe van een slinger.

Het grote voordeel van slingers is hun groot meetbereik ( $360^\circ$ ) en hun constante resolutie, onafhankelijk van de oriëntatie van het voorwerp. De resolutie wordt enkel bepaald door het minimaal moment dat nodig is om de wrijving in het scharnier te overwinnen. De scharnierende staaf is echter moeilijk te miniaturiseren omdat de wrijving in het scharnier afneemt met  $L^2$  [30] en het moment  $\vec{OA} \wedge m\vec{g}$  met  $L^4$ . Hierdoor daalt de resolutie bij toenemende miniaturisatie. Ook het alternatief met het touw

is niet miniaturiseerbaar omdat de basisveronderstelling van oneindige soepelheid van het touw in dwarse richting niet meer geldt bij kleiner wordende afmetingen.

### Vloeistof-oriëntatiesensoren

Vloeistof-oriëntatiesensoren bestaan uit een reservoir, gevuld met een vloeistof. Figuur 3.2(a) toont het principe van een elektrolytische oriëntatiesensor, waarbij het vloeistofreservoir voor de helft gevuld is met een elektrolyt. Het vrij vloeistofoppervlak blijft door de zwaartekracht steeds horizontaal en vormt hierdoor een horizontale referentie. De stand van dit vloeistofoppervlak ten opzichte van het reservoir wordt gemeten door elektrodes, die ondergedompeld zijn in het elektrolyt. De weerstandsverandering tussen deze elektrodes is een maat voor de kanteling van de sensor. Een voorbeeld is de twee-assige oriëntatiesensor SP5001 van Spectron & Electronics. Deze sensor heeft een bereik van  $\pm 50^\circ$ , een resolutie van  $0.005^\circ$ , een repeeteerbaarheid van  $0.01^\circ$  en een lineariteit van 10%. De uitslingertijd bedraagt 500ms. Figuur 3.2(b) toont een andere vloeistof-oriëntatiesensor, ontwikkeld door Kato [31]. Het vloeistofreservoir is volledig gevuld op een luchtbel na. Onder invloed van de zwaartekracht zoekt de luchtbel steeds het hoogste punt van het vloeistofreservoir op. Wanneer de sensor kantelt, verplaatst hierdoor de luchtbel. Deze verplaatsing wordt gemeten met behulp van een LED en een vier-kwadrantsfotodiode.



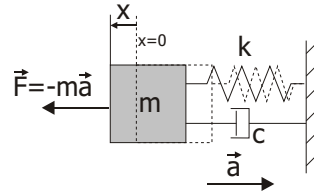
Figuur 3.2: Vloeistof-oriëntatiesensoren.

Vloeistof-oriëntatiesensoren hebben een zeer hoge resolutie doch een beperkte bandbreedte (typisch enkele Hz). De vereiste frequentiebereik voor het meten van de oriëntatie van de pen gaat echter van 0Hz tot 10Hz, zodat vloeistof-oriëntatiesensoren niet toepasbaar zijn.

### Accelerometers

Accelerometers bestaan uit een inertiële massa  $m$ , die opgehangen is aan een veer. De beweging van deze massa is gedempt. De accelerometer is dus te modelleren als een tweede-orde systeem, getoond in figuur 3.3. Onder invloed van de versnelling  $\vec{a}$ , ontstaat er een kracht  $-m\vec{a}$  op de massa. Hierdoor vervormt de veer en verplaatst de massa.

Deze verplaatsing kan bijvoorbeeld capacitief [32, 33], piëzo-elektrisch [34], piëzo-resistief [35, 36], thermisch [37], optisch [38, 39, 40, 41] of met het tunneling-effect [42, 43] gemeten worden. Bij sommige accelerometers wordt de massa in resonantie gebracht [44, 45, 46]. Het toepassen van krachtterugkoppeling - waarbij een actuator de kracht op de inertiële massa compenseert zodat de massa niet verplaatst - verhoogt de performantie. Een drie-assige servo-accelerometer met krachtterugkoppeling is ontwikkeld door Jono [47].

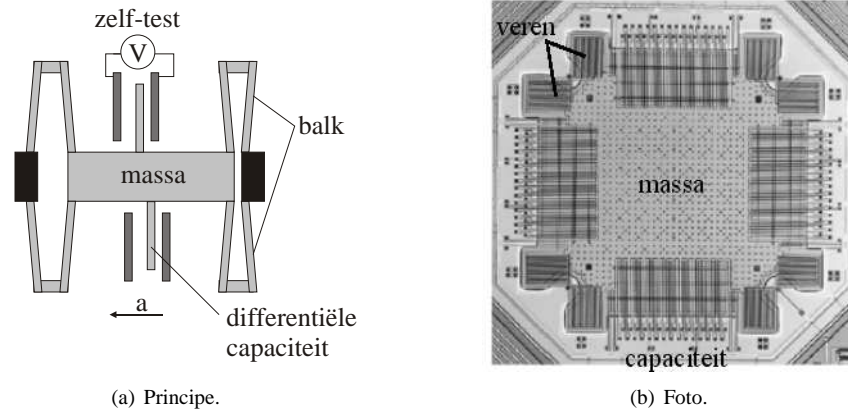


Figuur 3.3: Principe van een accelerometer.

In de laatste twee decennia heeft de ontwikkeling van silicium micro-accelerometers een hoge vlucht genomen. Een overzicht van de stand van zaken is te vinden in [48, 49]. Hierdoor bestaat er een grote verscheidenheid aan goedkope, commercieel verkrijgbare micro-accelerometers. Deze micro-accelerometers hebben voldoende maturiteit om in tal van toepassingen gebruikt te worden zoals airbags, auto-alarmen, tractie-controle en video-camera's. Een voorbeeld is de twee-assige accelerometer ADXL202 van Analog Devices [50].

Figuur 3.4(a) toont het basisprincipe van de ADXL202. Centraal staat een massa, die aan de hoekpunten opgehangen is aan vier balken. Onder invloed van de zwaartekracht of andere inertiële krachten op de massa, buigen de balken door en verplaatst de massa. Deze verplaatsing wordt met behulp van een reeks differentiële kamvormige capaciteiten gemeten. De differentiële kamvormige capaciteit wordt gevormd door een bewegende plaat, die tussen twee vaste platen staat. Twee blokvolven, die  $180^\circ$  in fase verschoven zijn, worden op de vaste platen aangelegd. Bij afwezigheid van een verplaatsing van de massa is de afstand tussen de bewegende plaat en beide vaste platen gelijk. Hierdoor is de capaciteit aan beide zijden gelijk en komt er geen spanning op de bewegende plaat. Wanneer de massa beweegt, ontstaat er een onbalans in de differentiële capaciteit, waardoor een blokvolg op de bewegende plaat ontstaat. De grootte van deze blokvolg is evenredig met de verplaatsing en dus met de inertiële kracht op de massa. Het signaal wordt verder door een geïntegreerde signaalverwerking gedemoduleerd, gefilterd en gedigitaliseerd tot een pulsbreedte-gemoduleerd signaal, dat de uitgang van de sensor vormt. Bovendien is de sensor uitgerust met een zelf-test, die toelaat om de correcte werking van de accelerometer te controleren. Tijdens de zelf-test wordt de massa elektrostatich geëxciteerd, zodat de massa een verplaatsing ondergaat die equivalent is aan een gekende referentie-versnelling.

Figuur 3.4(b) toont een foto van de twee-assige structuur van de ADXL202. De massa is aan de hoekpunten opgehangen zodanig dat hij in twee richtingen kan trans-



Figuur 3.4: ADXL202 van Analog Devices.

leren. Om deze translatie te meten zijn in beide richtingen een reeks kamvormige capaciteiten voorzien. De integratie van beide assen in één structuur zorgt voor een verhoging van de massa per as en een vermindering van de oppervlakte per as. Hierdoor stijgt de gevoeligheid en daalt de kostprijs. In grote aantallen ligt de kostprijs lager dan 10€. De ADXL202 heeft een meetbereik van  $\pm 2g$ , een resolutie van  $0.005g$  en een frequentiebereik van DC tot 500Hz. Zijn afmetingen bedragen 10.6mm x 9.9mm x 5.5mm. De recent uitgebrachte ADXL202E meet slechts 5mm x 5mm x 2mm [33].

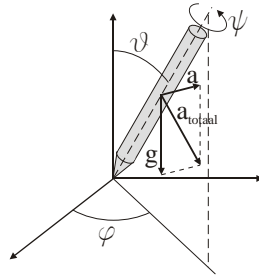
### c. Nauwkeurigheid

#### Fundamentele beperking van de nauwkeurigheid

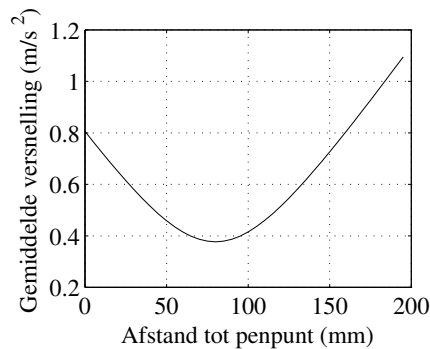
De nauwkeurigheid van een oriëntatiemeting op basis van de zwaartekracht wordt fundamenteel beperkt door de aanwezigheid van versnellingen. Fysisch is er immers geen onderscheid te maken tussen een versnelling en de zwaartekracht: beide worden steeds samen gemeten. Hierdoor wijkt de opgemeten richting af van de verticale referentie, zoals getoond in figuur 3.5.

De grootte van de storende versnelling varieert in functie van de positie in de pen. Daarom is het belangrijk om de optimale plaats te bepalen waar deze storende versnelling minimaal is. De versnelling van een pen tijdens het schrijven van een tekst is reeds in paragraaf 2.3.2 opgemeten met behulp van het Rodym-meetsysteem. Tijdens dit experiment is de tekst zo snel mogelijk geschreven, zodat een bovenlimiet voor de versnellingen bekomen werd. Figuur 3.6 toont het verloop van de gemiddelde versnelling in functie van de afstand tot de penpunt. Het optimum, waarbij de versnelling minimaal is, ligt op 80mm van de penpunt. De versnelling bedraagt daar nog  $0.38m/s^2$ . Merk op dat de ligging van dit optimale punt afhangt van de lichaamsbouw en de schrijfgewoonte van de gebruiker. De exacte locatie van dit optimale punt is echter niet kritisch, omdat de versnelling in een interval van  $\pm 20mm$  rond het optimale punt weinig verandert.





Figuur 3.5: Invloed versnelling op meting van de richting van de zwaartekracht.

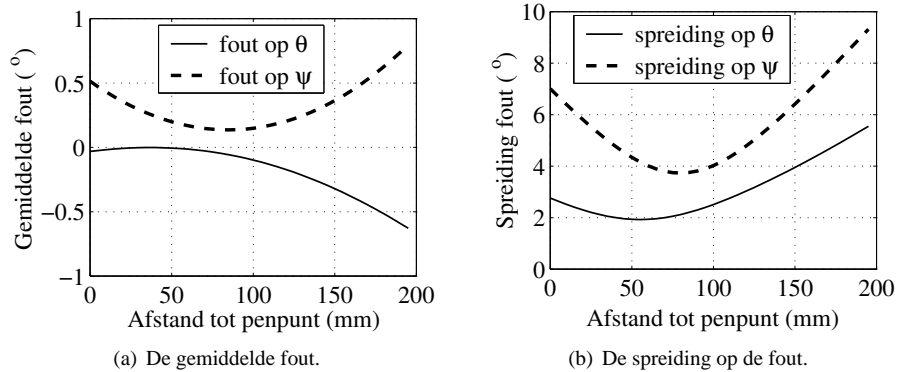


Figuur 3.6: Verloop van de versnelling in de pen.

Op basis van hetzelfde experiment met het Rodym-meetsysteem kan de invloed van de versnelling op de elevatiehoek  $\theta$  en de spinhoek  $\psi$  gesimuleerd worden. Uit de opgemeten versnelling van de penpunt en de opgemeten oriëntatieveranderingen wordt de versnelling in functie van de afstand tot de penpunt berekend. Deze versnelling wordt bij de zwaartekracht opgeteld en vervolgens op het pen-assenstelsel geprojecteerd. Een accelerometer vastgemaakt aan de pen zal deze projectie meten en hieruit de oriëntatie berekenen. Het verschil tussen deze berekende oriëntatie en de werkelijke oriëntatie geeft de invloed van de versnelling op de oriëntatiemeting. Figuur 3.7(a) en 3.7(b) tonen respectievelijk het gemiddelde en de spreiding op dit verschil in functie van de afstand tot de penpunt. Hieruit blijkt dat over een lange tijdsperiode de gemiddelde fout beperkt is tot  $0.05^\circ$  voor  $\theta$  en  $0.14^\circ$  voor  $\psi$ . De spreiding bedraagt echter  $2.1^\circ$  voor  $\theta$  en  $3.7^\circ$  voor  $\psi$ . Deze waarden vormen een bovengrens: indien de tekst langzaam geschreven wordt, dalen de versnellingen en dus ook de fout.

### Vereiste nauwkeurigheid

Aangezien slingers moeilijk te miniaturiseren zijn en vloeistof-oriëntatiesensoren een beperkt bandbreedte hebben, kan de richting van de zwaartekracht enkel met behulp



Figuur 3.7: Dynamische fout op de elevatiehoek  $\theta$  en de spinhoek  $\psi$ .

van twee of drie-assige accelerometers bepaald worden. De twee-assige accelerometer geniet hierbij de voorkeur omwille van de lagere kostprijs. De hier uitgewerkte berekening van de vereiste nauwkeurigheid beperkt zich daarom enkel tot twee-assige accelerometers.

Bij afwezigheid van externe versnellingen wordt de nauwkeurigheid van de hoeken bepaald door de systematische en toevallige fouten op de sensor-signalen. Daar systematische fouten steeds compenseerbaar zijn, moeten enkel de toevallige fouten beschouwd worden. De foutenvoortplanting van deze fout naar de hoeken  $\theta$  en  $\psi$  is berekend in Bijlage C.1.2 en resulteert in:

$$\sigma_{\theta} = \frac{\sigma_a}{a_z^{\text{voorwerp}}} = \frac{\sigma_a}{g \cos(\theta)}, \quad (3.5)$$

$$\sigma_{\psi} = \frac{\sigma_a}{\sqrt{(a_x^{\text{voorwerp}})^2 + (a_y^{\text{voorwerp}})^2}} = \frac{\sigma_a}{g \sin(\theta)}, \quad (3.6)$$

met  $\sigma_a$ ,  $\sigma_{\theta}$  en  $\sigma_{\psi}$  respectievelijk de spreiding op de versnelling  $[a_x \ a_y \ a_z]^T_{\text{voorwerp}}$ , de elevatiehoek  $\theta$  en de spinhoek  $\psi$ . De spreiding op  $\theta$  vergroot bij toenemende  $\theta$ . Om bij  $\theta = 50^\circ$  een maximale spreiding van  $0.5^\circ$  te garanderen, moet de maximaal toegelaten spreiding  $\sigma_a$   $0.007g$  of  $0.07\text{m/s}^2$  bedragen. De spreiding  $\sigma_{\psi}$  neemt toe bij kleiner wordende  $\theta$ . Bij  $\theta = 0^\circ$  is  $\sigma_{\psi}$  zelfs oneindig. Dit wordt veroorzaakt door de singulariteit van de ZYZ-Eulerhoeken bij  $\theta = 0^\circ$ . Om numerieke problemen te vermijden, moet het algoritme bij  $\theta < 25^\circ$  overschakelen naar RPY-hoeken. De formules voor RPY-hoeken zijn te vinden in Bijlage C.1.1. Bij  $\theta = 25^\circ$  bedraagt de maximaal toegelaten spreiding op de versnelling  $0.008g$  of  $0.08\text{m/s}^2$ . Merk op dat bij een drie-assige accelerometer de spreiding op de hoeken  $\theta$  en  $\psi$  minder gevoelig is voor een verandering van de hoek  $\theta$ . Zoals eerder vermeld weegt dit voordeel niet op tegen de hogere kostprijs.

In bovenstaande afleiding is de zwaartekracht  $g$  als een exact gekende constante beschouwd, die geen bijdrage levert tot de fout op  $\theta$  en  $\psi$ . Nochtans varieert de zwaartekracht over het aardoppervlak, in de tijd en in de hoogte. Zo bedraagt de

zwaartekracht gemeten in Londen  $9.8127m/s^2$ , terwijl de zwaartekracht in Quito, dat gelegen is op de evenaar en op een hoogte van 2800m,  $9.7725m/s^2$  bedraagt [51]. De voornaamste variatie van de zwaartekracht is het gevolg van de niet-ideaal ronde vorm van de aarde en de aanwezigheid van de centrifugale kracht veroorzaakt door de rotatie van de aarde [52]. In 1980 werd door de International Association of Geodesy de volgende uitdrukking voor de zwaartekracht  $g$  (in  $cm/s^2$ ) in functie van de breedtegraad  $\phi_{aarde}$  vooropgesteld [53]:

$$g = 970.0327(1 + 5302.4^{-6} \sin(\phi_{aarde}) - 5.8^{-6} \sin^2(2\phi_{aarde})). \quad (3.7)$$

Hieruit volgt dat de maximale variatie in de zwaartekracht 0.53% bedraagt. Voor een oriëntatiemeting bij  $\theta$  gelijk aan  $50^\circ$  betekent deze variatie een fout van  $0.3^\circ$  op  $\theta$ . Deze fout kan echter volledig weggewerkt worden door rekening te houden met de breedtegraad waar men zich bevindt.

#### d. Besluit

De elevatiehoek  $\theta$  en de spinhoek  $\psi$  kunnen op basis van de zwaartekracht bepaald worden. De azimuthhoek  $\varphi$  is niet observeerbaar. Om de richting van de zwaartekracht te meten, zijn slingers (niet miniaturiseerbaar) en vloeistof-oriëntatiesensoren (beperkt frequentiebereik) niet geschikt. Twee- en drie-assige accelerometers vormen wel een optie. Hierbij zijn drie-assige accelerometers nauwkeuriger, maar ook duurder. Aangezien de kostprijs een belangrijk criterium vormt, wordt geopteerd voor een twee-assige accelerometer.

De nauwkeurigheid van deze methode wordt fundamenteel beperkt door de beweging van de pen. Deze beweging zorgt voor een versnelling die samen met de zwaartekracht gemeten wordt. Testen tonen aan dat de systematische fout op de hoekbepaling beperkt blijft tot  $0.14^\circ$  voor  $\theta$  en  $0.05^\circ$  voor  $\psi$ . De spreiding op de fout bedraagt echter  $2.1^\circ$  voor  $\theta$  en  $3.7^\circ$  voor  $\psi$ . Deze waarden vormen een bovengrens. Wanneer de tekst langzamer geschreven wordt, dalen de versnellingen en bijgevolg de fouten.

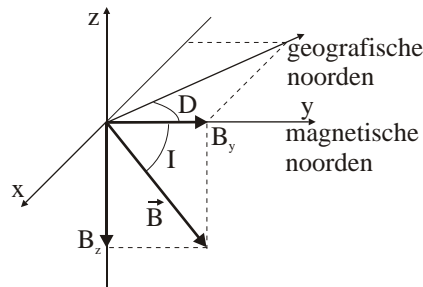
Wanneer de pen niet beweegt, wordt de nauwkeurigheid van de hoekmeting bepaald door de nauwkeurigheid van de twee-assige accelerometer. Om statisch een nauwkeurigheid van  $0.5^\circ$  te halen, moet de nauwkeurigheid ( $2\sigma$  van de accelerometer minimaal 0.013g bedragen. Commercieel beschikbare micro-accelerometers zijn in staat om de zwaartekracht met deze nauwkeurigheid te meten.

### 3.2.2 Rechtstreekse oriëntatiemeting op basis van het aardmagnetisch veld

#### a. Principe

Het aardmagnetisch veld zorgt voor een natuurlijke, absolute referentie voor het bepalen van de oriëntatie van een voorwerp. Het aardmagnetisch veld is vereenvoudigd voor te stellen als een - virtuele - dipool op 500km van het middelpunt van de aarde. De as van deze dipool maakt een hoek van  $10.5^\circ$  met de rotatie-as van de aarde. Deze dipool veroorzaakt in elk punt van het aardoppervlak een magnetische inductie  $\vec{B}$ .

Door de y-as van het vast assenstelsel te laten samenvallen met de horizontale component van  $\vec{B}$ , is deze vector te schrijven als  $[0 \ B_y \ B_z]^T_{vast}$ . Deze vector, getoond in figuur 3.8, maakt een hoek I (de inclinatie) met het horizontale vlak. De inclinatie I varieert van  $-90^\circ$  aan de zuidpool, over  $0^\circ$  op de evenaar tot  $90^\circ$  aan de noordpool. Verder maakt deze vector in het horizontale vlak een hoek D (de declinatie) met het geografische noorden omdat de magnetische polen van de dipool niet samenvallen met de geometrische polen van de rotatie-as van de aarde. Deze afwijking D is plaatsafhankelijk. De grootte van de magnetische inductie  $\vec{B}$  is eveneens plaatsafhankelijk: op de geomagnetische evenaar bedraagt hij  $30\mu\text{T}$  en op de geomagnetische polen bedraagt hij  $60\mu\text{T}$ .



Figuur 3.8: Het aardmagnetisch veld op noordelijk halfrond.

In principe kunnen twee hoeken uit de richting van het magnetisch veld berekend worden. In de praktijk wordt het aardmagnetisch veld enkel gebruikt om de azimuthhoek  $\varphi$  te bepalen. Hiervoor moet de richting van de horizontale component van het aardmagnetisch veld gemeten worden. Net zoals bij de zwaartekracht kan deze richting gemeten worden door een referentie evenwijdig met het magnetisch veld te creëren en de azimuthhoek  $\varphi$  rechtstreeks af te lezen. Een mechanisch kompas met een naald is hiervan een voorbeeld. Een andere mogelijkheid bestaat uit het opmeten van de projectie  $[B_x^{voorwerp} \ B_y^{voorwerp}]$  van de horizontale component van het aardmagnetisch veld op de x- en y-as van het voorwerp-assenstelsel. Hieruit is de azimuthhoek  $\varphi$  te berekenen volgens:

$$\varphi = \text{bgtg}\left(\frac{B_x^{voorwerp}}{B_y^{voorwerp}}\right). \quad (3.8)$$

Wanneer het voorwerp echter kantelt, blijft een sensor vastgemaakt aan het voorwerp niet horizontaal. De verticale component van het aardmagnetisch veld wordt dan ook gemeten, waardoor een sterke afwijking van het kompas ontstaat. Hiervoor bestaan twee oplossingen:

- De sensor wordt rotatievrij ten opzicht van het voorwerp opgehangen, zodanig dat hij steeds in het horizontaal vlak blijft, onafhankelijk van de kanteling van het voorwerp. De azimuthhoek  $\varphi$  wordt dan berekend volgens formule (3.8). Deze oplossing is volumineus door de dubbele ophanging en is gevoelig voor

schokken door de bewegende onderdelen. Deze oplossing is daarom niet geschikt voor een computerpen.

- De sensor wordt aan het voorwerp vastgemaakt. Deze sensor meet de projectie  $[B_x \ B_y \ B_z]_{voorwerp}^T$  van het aardmagnetisch veld in het voorwerp-assenstelsel volgens:

$$\vec{B}^{voorwerp} = R_{ZYZEuler}^T [0 \ B_y \ B_z]_{vast}^T, \quad (3.9)$$

met  $R_{ZYZEuler}$  de transformatiematrix opgesteld in Bijlage B.2. Met behulp van een tweede sensor die de elevatiehoek  $\theta$  en de spinhoek  $\varphi$  meet, kan hieruit de azimuthhoek  $\psi$  berekend worden met de volgende formules:

$$\begin{aligned} a &= B_x^{voorwerp} + s_\theta c_\psi c_\theta^{-1} B_z^{voorwerp}, \\ b &= B_y^{voorwerp} - s_\theta s_\psi c_\theta^{-1} B_z^{voorwerp}, \\ \varphi &= \text{bgtg}\left(\frac{-ac_\psi c_\theta + bs_\psi c_\theta}{-as_\psi - bc_\psi}\right). \end{aligned} \quad (3.10)$$

Indien de verticale component van het magnetisch veld  $B_z^{vast}$  eerst door een kalibratiestap bepaald wordt, volstaat een twee-assige sensor die  $B_x^{voorwerp}$  en  $B_y^{voorwerp}$  meet. De azimuthhoek wordt dan berekend volgens:

$$\begin{aligned} a &= B_x^{voorwerp} + s_\theta c_\psi B_z^{vast}, \\ b &= B_y^{voorwerp} - s_\theta s_\psi B_z^{vast}, \\ \varphi &= \text{bgtg}\left(\frac{-ac_\psi + bs_\psi}{-ac_\theta s_\psi - bc_\theta c_\psi}\right). \end{aligned} \quad (3.11)$$

De afleiding van bovenstaande formules is terug te vinden in Bijlage C.2.1.

## b. Sensoren

Er bestaan een groot aantal principes om een magnetisch veld te meten. Uit de bespreking van Lenz [54] blijkt dat meerdere principes niet geschikt zijn voor kompassen omdat:

- hun meetbereik niet overlapt met de grootte van het aardmagnetisch veld (Magnetodiode, Magnetotransistor, Magneto-Optische Sensor);
- ze een grote hysteresis vertonen (Reuze Magnetoresistief effect);
- ze geen statisch magnetische velden meten (solenoiden);
- ze niet werken bij kamertemperatuur (SQUID);
- ze te omvangrijk zijn (Optically Pumped Magnetometer, SQUID);
- ze nog volop in ontwikkeling zijn (Nuclear-Precession Magnetometer, Fiber-Optic Magnetometer, Magneto-elastisch).

De hier volgende bespreking beperkt zich daarom enkel tot vier principes die veelvuldig voor kompassen gebruikt worden.

### Mechanisch kompas

Een mechanisch kompas is gebaseerd op een ringmagneet of een staafmagneet die vrij kan roteren in het horizontale vlak. Onder invloed van het aardmagnetisch veld wijst

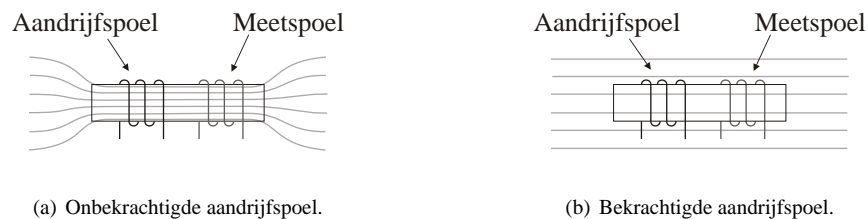
deze magneet steeds naar de geomagnetische noordpool. De rotatie van de magneet ten opzichte van de behuizing geeft bijgevolg de azimuthhoek  $\varphi$ . Deze rotatie kan met een gradenboog of met een elektronisch meetsysteem gemeten worden.

Mechanische kompassen vereisten een speciale ophanging om het kompas steeds horizontaal te houden. Hierdoor bevatten ze veel bewegende onderdelen, waardoor ze slechts beperkt miniaturiseerbaar zijn. Bovendien zijn ze gevoelig voor schokken, trillingen en versnellingen. Deze gevoeligheid kan verminderd worden door het kompas te voorzien van een dempende vloeistof, maar deze vloeistof beperkt tevens het dynamisch bereik van het kompas.

Een voorbeeld is het mechanisch kompas 1655 van Dinsmore Sensors [55]. Dit kompas meet  $\phi 12.7\text{mm} \times 16\text{mm}$  en weegt 2.25gram. Door de aanwezigheid van een dempende vloeistof, heeft het kompas een uitslingertijd van 2.5s. Zijn kostprijs bedraagt 33.6€.

### Flux-gate kompas

Flux-gate sensoren zijn gebaseerd op de magnetische verzadiging van een metalen kern. Figuur 3.9 toont het principe. Rond de metalen kern is een aandrijfspoel gewikkeld. Bij afwezigheid van een bekrachtiging van de aandrijfspoel, gaat het extern magnetisch veld door de metalen kern. Wanneer de aandrijfspoel bekrachtigd wordt, ontstaat er een groot magnetisch veld waardoor de kern magnetisch in verzadiging gaat. Hierdoor kan het extern magnetisch veld niet meer door de metalen kern. Door de aandrijfspoel afwisselend te bekrachtigen, worden de magnetische veldlijnen dus in en uit de metalen kern gedreven. Deze verandering van magnetische veldlijnen wordt met een meetspoel gemeten. Flux-gate sensoren converteren dus een statisch magnetisch veld naar een dynamisch magnetisch veld zodat een meetspoel het veld kan meten. In het vereenvoudigde voorbeeld van figuur 3.9 beïnvloedt de aandrijfspoel de meetspoel. Andere configuraties, waarbij de meetspoel onafhankelijk van de aandrijfspoel is, zijn te vinden in [56]. Een variant van de klassieke, gewikkelde flux-gate spoelen zijn de 2D geïntegreerde flux-gate sensoren, die op een siliciumsubstraat aangebracht worden [57]. Deze 2D geïntegreerde flux-gate sensoren hebben slechts een beperkte nauwkeurigheid.



Figuur 3.9: Principe flux-gate magnetische sensor.

Flux-gate sensoren hebben geen bewegende onderdelen, waardoor ze ongevoelig zijn voor schokken, trillingen en versnellingen. Daartegenover staat dat de gevoeligheid van de meetspoelen daalt bij toenemende miniaturisatie. De gevoeligheid van

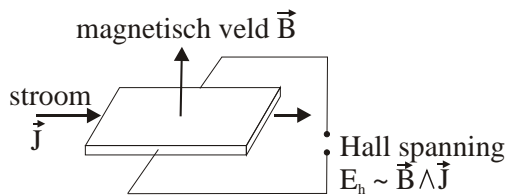
de meetspoel is immers evenredig met het aantal windingen en bij kleiner wordende afmetingen daalt het aantal windingen. Bovendien vereist de aandrijfspool een groot vermogen, waardoor flux-gate sensoren minder geschikt zijn voor draagbare toepassingen die met een batterij gevoed worden.

Een voorbeeld is de drie-assige magnetische sensor APS533 van WUNTRONIC. Deze heeft een bereik van  $\pm 10^{-4}$ T, een nauwkeurigheid van  $0.1^\circ$ , een frequentiebereik van DC tot 400Hz en een zeer lage temperatuursgevoeligheid. Zijn totaal vermogenverbruik bedraagt 200mW. Hij meet  $\phi 18.4\text{mm} \times 38.1\text{mm}$ .

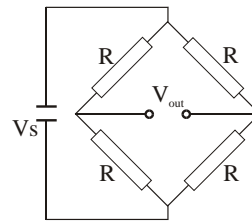
### Hall-effect kompas

Figuur 3.10 toont het principe van een Hall-effect sensor. Deze sensor is gebaseerd op de spanning  $E_h$ , die ontstaat op de zijkanten van een stroomvoerende geleider of halfgeleider met stroomdichtheid  $\vec{J}$ , wanneer deze geleider of halfgeleider in een magnetisch veld  $\vec{B}$  geplaatst wordt. Hierbij is het Hall-effect bij een halfgeleider veel groter dan bij een geleider. Bijgevolg is de resolutie bij een geleider beperkt tot  $100\mu\text{T}$ , terwijl de duurere Hall-effect sensoren gebaseerd op een halfgeleider een resolutie tot  $0.1\mu\text{T}$  halen [54, 56].

Het frequentiebereik varieert vanaf DC tot 1MHz. Ze hebben kleine afmetingen ( $6\text{mm}^2$ ) en een zeer groot temperatuursbereik. Bij gebrek aan bewegende onderdelen zijn ze ongevoelig voor schokken, trillingen en versnellingen.



Figuur 3.10: Principe van een Hall-effect kompas.



Figuur 3.11: Principe van een magneto-resistief kompas.

### Magneto-resistieve kompas

Magneto-resistieve kompassen zijn gebaseerd op het magneto-resistieve effect, waarbij de elektrische weerstand van een materiaal wijzigt onder invloed van een extern magnetisch veld. Om de kleine weerstandsverandering te meten, worden vier weerstanden in een brug-schakeling geplaatst. (Zie figuur 3.11.) Elke weerstand wordt gevormd door het deponeren van een ferromagnetische dunne film op een siliciumsubstraat. Daar deze technologie compatibel is met de productieprocessen voor geïntegreerde schakelingen, kunnen op hetzelfde substraat ook de uitleeselectronica en de temperatuurscompensatie voorzien worden.

Door hun hoge resolutie, kleine afmetingen en lage kostprijs vervangt dit type sensor steeds meer de flux-gate kompassen. Het frequentiebereik gaat van DC tot bijna 1GHz en ze zijn bruikbaar in een groot temperatuursbereik van  $-55^{\circ}\text{C}$  tot  $200^{\circ}\text{C}$ . Ze hebben geen bewegende onderdelen, zodat ze ongevoelig zijn voor schokken, trillingen en versnellingen.

Een voorbeeld is de twee-assige magnetische sensor HMC1022 van Honeywell [58]. Hij heeft een bereik van  $\pm 600\mu\text{T}$ , een resolutie van  $8.5\text{nT}$  en een frequentiebereik van DC tot 5MHz. Hij meet  $11.3\text{mm} \times 6.2\text{mm} \times 1.7\text{mm}$  en kost minder dan 10€.

### c. Nauwkeurigheid

#### Fundamentele beperking van de nauwkeurigheid.

De nauwkeurigheid van een magnetisch kompas wordt fundamenteel beperkt door de vervormingen van het aardmagnetisch veld, waardoor de horizontale component van de magnetische inductie  $\vec{B}$  niet op elke plaats naar de geomagnetische noordpool wijst. Deze vervormingen zijn op te splitsen in globale en lokale vervormingen.

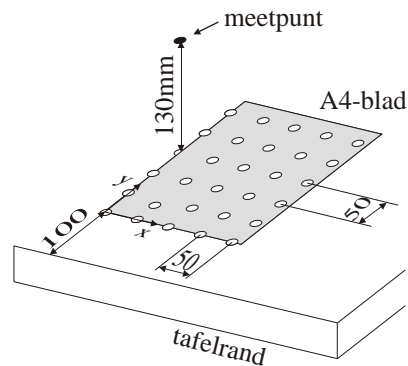
Globale vervormingen worden onder andere veroorzaakt door de structuur van de ondergrond, de langzame verschuiving van de dipool-as ten opzichte van de rotatie-as van de aarde en de invloed van de zon en de maan op de atmosfeer [59, 60]. Alhoewel deze globale veranderingen belangrijk zijn voor navigatie over grote afstanden en over grote tijdsspannes, zijn ze voor de pentoeppinging verwaarloosbaar. Deze storingen zijn immers gedurende het schrijven op een A4-blad als een constante te beschouwen, waardoor ze enkel een systematische fout op het bepalen van het noorden geven. Om de tekst te reconstrueren is echter niet het exacte noorden belangrijk, maar wel de relatieve oriëntatie van de pen ten opzichte van het A4-blad. Hierdoor heeft deze fout geen effect op de tekstreconstructie.

Lokale vervormingen van het aardmagnetisch veld zijn wel belangrijk voor tekstreconstructie. Ze worden veroorzaakt door magneten, ijzeren voorwerpen en elektrische toestellen, die zich in de nabijheid van het A4-blad bevinden. De aanwezigheid van magneten op het bureaublad is echter gemakkelijk te vermijden. Anders ligt het voor metalen voorwerpen en elektrische toestellen.

Beschouw eerst de invloed van metalen voorwerpen. Om een realistische waarde voor de vervorming van het aardmagnetisch veld te bekomen, is de richting van het magnetisch veld op vier bureau's gemeten. Figuur 3.12 toont een schets van het experiment. Het experiment bestaat uit 30 metingen van de richting van het magnetisch veld in een horizontaal vlak. De meetpunten liggen in een matrix van  $5 \times 6$  punten, met een tussenafstand van 50mm. Telkens wordt 130mm boven het tafelopervlak gemeten. Deze hoogte stemt overeen met het bovenste punt van een pen met een lengte van 165mm die  $36^{\circ}$  scheef gehouden wordt. Het is met ander woorden het punt in de pen dat het verst verwijderd is van mogelijke storingsinvloeden op het bureau. Voor de meting is een mechanisch kompas met een resolutie van  $1^{\circ}$  gebruikt.

Figuur 3.13 toont de resultaten van de vier experimenten. Zonder een vervorming van het aardmagnetisch veld, zou elke meting dezelfde hoek geven, onafhankelijk van de positie op het blad. In praktijk bestaat er wel een hoekafwijking. Figuur 3.13(a) toont de meting van de azimuthhoek in het geval van een houten bureau met een





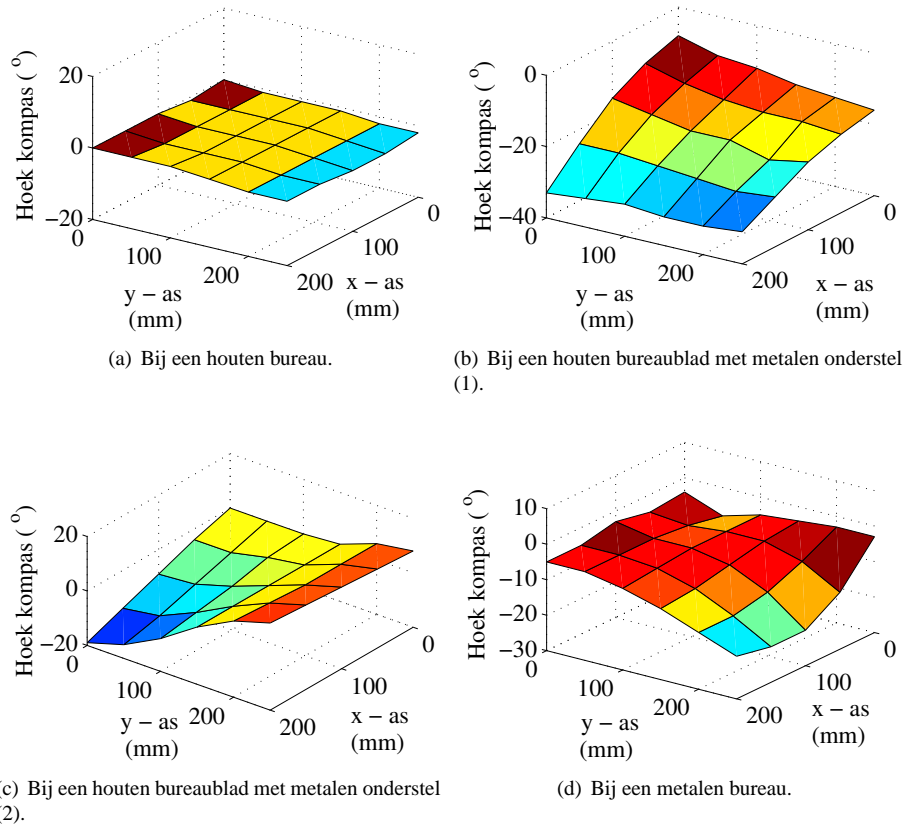
Figuur 3.12: Meting van het magnetisch veld boven een bureau.

groot gietijzeren frame (1m x 0.7m x 0.9m) op 1m afstand. De hoekafwijking van het magnetisch veld is beperkt tot  $2^\circ$ . Deze proef toont aan dat grote metalen voorwerpen op 1m afstand slechts een beperkte invloed op de metingen hebben. Figuur 3.13(b) en 3.13(c) toont twee voorbeelden van het magnetisch veld boven een bureau met een houten bureaublad, maar met metalen verstevigingsbalken en metalen poten. De fout over een A4-blad neemt aanzienlijk toe tot  $0.1^\circ/\text{mm}$ . Indien een pennentrek - dit is een periode waarbij de pen continu het papier raakt - 3cm lang is, bedraagt de fout op het magnetisch veld  $3^\circ$ . Deze fout valt binnen de specificaties. De laatste figuur 3.13(d) toont het magnetisch veld boven een metalen bureau met een metalen oppervlak. De fout is kleiner dan bij de vorige twee proeven, namelijk  $0.03^\circ/\text{mm}$ . Dit is te verklaren doordat het grote metalen oppervlak van de bureau niet voor sterke lokale wijzigingen op het A4-blad zorgt. De sterke kromming van het aardmagnetisch veld situeert zich immers aan de rand van het bureau en niet in de buurt van het schrijfooppervlak.

Naast de - statische - afwijking van het aardmagnetisch veld, wordt een kompas ook gestoord door de aanwezigheid van elektrische apparaten, die een wisselend magnetisch veld uitstralen. Tabel 3.2 geeft de magnetische veldsterkte van enkele typische elektrische apparaten [61]. Ter vergelijking: het aardmagnetisch veld in westerse landen ligt rond  $50\mu\text{T}$ . Deze cijfers tonen aan dat elektrische apparaten weinig invloed uitoefenen op een kompas op voorwaarde dat de toestellen niet vlak naast het papier liggen. Van op een afstand van 1 meter zijn ze volledig te verwaarlozen. Bovendien hebben deze magnetische velden een hogere frequentie dan de te meten oriëntatieveranderingen, waardoor filtering mogelijk is.

#### Vereiste nauwkeurigheid van de magnetische sensor

Afgezien van de vervormingen van het aardmagnetisch veld, wordt de nauwkeurigheid van de azimuthhoek  $\varphi$  bepaald door de nauwkeurigheid van de magnetische sensor. Neem het vereenvoudigde geval van een twee-assige magnetische sensor in het horizontale vlak. De azimuthhoek  $\varphi$  wordt dan volgens formule (3.8) berekend. De foutenvoorplanting van een toevallige fout  $\sigma_B$  op beide assen van de magnetische



Figuur 3.13: Richting van het horizontaal magnetisch veld

Tabel 3.2: Magnetisch veld van elektrische toestellen.

toestel	Magnetisch veld op 3cm ( $\mu\text{T}$ )	Magnetisch veld op 1m ( $\mu\text{T}$ )
klokradio	10-50	0.01 - 0.02
fluorescentie-lamp	40-400	0.02-0.25
koelkast	0.5-1.7	0.01
elektr. verwarming	2-10	0.05-0.3
televisie	2.5-50	0.01-0.15
stofzuiger	200-800	0.13-2

sensor bedraagt:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{1}{\sqrt{(B_x^{\text{voorwerp}})^2 + (B_y^{\text{voorwerp}})^2}} \sigma_B \quad (3.12)$$

De afleiding van deze formule is terug te vinden in Bijlage C.2.2. Om een nauwkeurigheid van  $5^\circ$  te halen, moet de maximale spreiding op het magnetisch veld  $4\mu\text{T}$  bedragen.

#### d. Besluit

Het aardmagnetisch veld vormt een natuurlijke, absolute referentie voor het meten van de azimuthoek  $\varphi$ . Hiervoor is een combinatie van een twee- of drie-assige magnetische sensor en een twee-assige hoeksensor vereist. In het geval van een twee-assige magnetische sensor moet het magnetisch veld op die plaats gekend zijn. Voor het meten van het aardmagnetisch veld zijn het Hall-effect of het magneto-resistief effect het meest geschikt.

De nauwkeurigheid van dit principe wordt fundamenteel beperkt door de lokale vervormingen van het aardmagnetisch veld. Deze vervormingen worden veroorzaakt door de aanwezigheid van magneten en metalen voorwerpen. De fout veroorzaakt door metalen onderdelen aan het bureau kan oplopen tot  $0.1^\circ/\text{mm}$ . Verafgelegen metalen voorwerpen langs het bureau hebben echter een beperkte invloed (maximaal  $2^\circ$  over een A4-blad). Elektrische apparaten hebben enkel een invloed als ze vlak naast het papier staan. Van op een afstand van 1 meter is het effect verwaarloosbaar. Een richtwaarde voor de spreiding op de magnetische sensor is  $4\mu\text{T}$ . Deze spreiding is makkelijk haalbaar. De magnetische sensor HMC1022 van Honeywell haalt een resolutie van  $8.5\text{nT}$ .

### 3.2.3 Onrechtstreekse oriëntatiemeting op basis van de hoeksnelheid

#### a. Principe

De oriëntatie van een voorwerp is indirect te bepalen uit de hoeksnelheid, opgemeten met een drie-assige gyroscoop, op voorwaarde dat de beginoriëntatie gekend is. De gyroscoop is vastgemaakt aan het voorwerp en meet bijgevolg de hoeksnelheden in het voorwerp-assenstelsel. Met behulp van de transformatiematrix  $R_{ZYZEuler}$  wordt hieruit de rotatievector  $[w_x^{vast}, w_y^{vast}, w_z^{vast}]$  in het vast assenstelsel berekend. Tussen deze rotatievector en de tijdsafgeleiden van ZYZ-Eulerhoeken bestaat het volgende verband:

$$\begin{aligned}\dot{\varphi} &= -c_\varphi c_\theta s_\theta^{-1} w_x^{vast} - s_\varphi c_\theta s_\theta^{-1} w_y^{vast} + w_z^{vast}, \\ \dot{\theta} &= -s_\varphi w_x^{vast} + c_\varphi w_y^{vast}, \\ \dot{\psi} &= s_\varphi s_\theta^{-1} w_y^{vast} + c_\varphi s_\theta^{-1} w_x^{vast},\end{aligned}\tag{3.13}$$

waarbij c staat voor cosinus, s voor sinus. De afleiding van deze formules is te vinden in Bijlage C.3.1. Uit deze tijdsafgeleiden wordt oriëntatie van het voorwerp bekomen door enkelvoudige integratie volgens:

$$\alpha = \int \dot{\alpha} dt + \alpha_0,\tag{3.14}$$

met  $\alpha$  één van de drie Eulerhoeken,  $\dot{\alpha}$  zijn tijdsafgeleide en  $\alpha_0$  de beginwaarde van deze hoek. De beginoriëntatie moet bepaald worden door de pen in een houder te plaatsen of door de pen uit te rusten met een bijkomende absolute oriëntatiesensor.

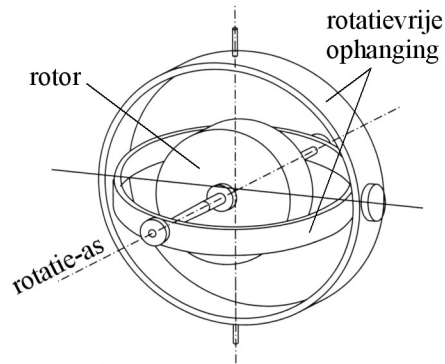
Voor het nauwkeurig bepalen van de oriëntatie over een grote tijdspanne moet de rotatie van de aarde in rekening gebracht worden. Deze bedraagt  $360^\circ / (24 \text{ uur } 60 \text{ min/uur}) = 0.25^\circ/\text{min}$ .

### b. Sensoren

De hoeksnelheid wordt gemeten met een gyroscoop. De eerste gyroscopen waren gebaseerd op een snel ronddraaiende rotor. Moderne ontwikkelingen zijn de optische en vibrerende gyroscoop.

#### De roterende gyroscoop

De roterende gyroscoop is gebaseerd op het behoud van rotatiemoment van een snel ronddraaiende rotor. Op basis van de ophanging van de rotor zijn er twee types van roterende gyroscopen te onderscheiden. Figuur 3.14 toont het eerste type, waarbij de rotor rotatievrij opgehangen is. Hierdoor werken er geen externe momenten op de rotatie-as en blijft de oriëntatie van de rotatie-as ten opzicht van het vast assenstelsel behouden als de behuizing roteert. De oriëntatie van de rotatie-as vormt met ander woorden een vaste referentie, waarmee de rotatie van de gyroscoop gemeten wordt. Bij de tweede variant van de roterende gyroscoop is de rotatie-as aan de behuizing vastgemaakt. De momenten, die nodig zijn om de rotatie-as met de behuizing mee te laten bewegen, worden gemeten en zijn een maat voor de hoeksnelheid.



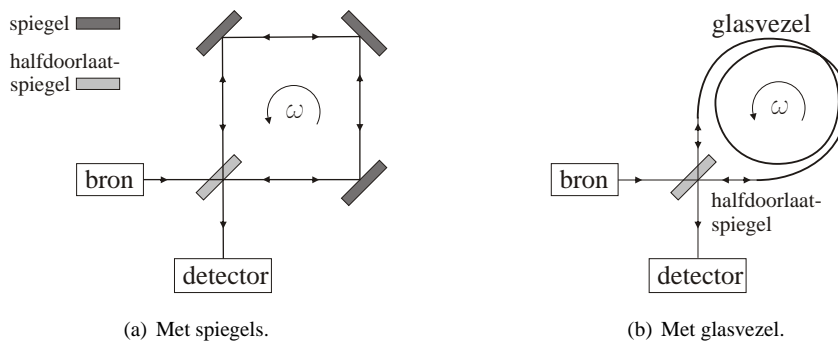
Figuur 3.14: Vrij-opgehangen roterende gyroscoop [62].

Mechanische gyroscopen zijn moeilijk te miniaturiseren door het groot aantal onderdelen, waaronder een actuator om de rotor te laten ronddraaien. Bovendien neemt de inertie van de schijf - waarop de mechanische gyroscoop gebaseerd is - met de vierde macht van de diameter van de schijf af. Verder vertonen zelfs kwalitatief hoogstaande gyroscopen drift door de wrijving in de lagers, externe invloeden en kleine

onbalansen inherent aan de constructie van de rotor. Alhoewel kwaliteitsgyroscopen voor inertie navigatiesystemen van vliegtuigen een drift van  $0.1^\circ$  gedurende een zes uur durende vlucht halen [63], hebben goedkope, kleine gyroscopen typisch een drift van  $10^\circ/\text{min}$  [56].

### De optische gyroscop

Figuur 3.15 toont het principe van de optische gyroscop [64, 65]. De optische gyroscop is gebaseerd op het verschil in voorplantingstijd van twee lichtstralen die in tegengestelde richting een rechthoekig of cirkelvormig pad afleggen. Bij afwezigheid van een rotatie hebben beide lichtstralen evenveel tijd nodig om op hun beginpunt aan te komen. Wanneer de gyroscop roteert, verplaatst het beginpunt waardoor één lichtstraal sneller op zijn beginpunt arriveert dan de andere lichtstraal. Het verschil in afgelegde weg is evenredig met de rotatiesnelheid. Dit verschijnsel wordt het Sagnac-effect genoemd. Het verschil in afgelegde weg resulteert in een faseverschil tussen beide lichtstralen, waardoor de interferentie tussen beide lichtstralen verandert. Om het rechthoekig of cirkelvormig pad te creëren, worden respectievelijk spiegels of glasvezels gebruikt.



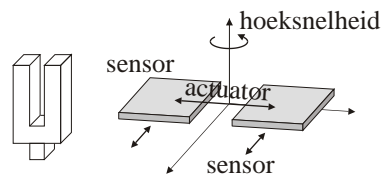
Figuur 3.15: Principe van de optische gyroscop.

Optische gyroscopen hebben betere eigenschappen dan roterende gyroscopen. Door afwezigheid van bewegende onderdelen is hun onderhoud beperkt en zijn ze ongevoelig voor de versnellingen en de zwaartekracht. Ze vereisen geen opwarmingstijd en hun lineariteit is hoger. Optische gyroscopen zijn echter moeilijk te miniaturiseren omdat het verschil in weglengte evenredig is met het kwadraat van de straal van het lichtpad [66]. Bij miniaturisatie daalt dus het verschil in weglengte, waardoor de resolutie vermindert. Bovendien is de maximale kromming van glasvezels beperkt. Meer uitleg over deze maximale kromming van glasvezels is te vinden in paragraaf 4.2.2.

### De vibrerende gyroscop

Een vibrerende gyroscop is gebaseerd op de Coriolis-kracht. Dit is de schijnbare kracht op een massa met snelheid  $v$ , vastgesteld door een waarnemer in een roterend assenstelsel. De Coriolis-kracht staat loodrecht op de snelheid en de rotatie-as. Hij

is gelijk aan  $2m\dot{\alpha} \times v$ , met  $\dot{\alpha}$  de rotatiesnelheid van het roterend assenkruis en  $m$  de massa. Deze kracht is veel kleiner dan de andere inertiële krachten die op de massa inwerken. Daarom wordt de massa op resonantiefrequentie geëxiteerd, waardoor de Coriolis-krachten naar een hogere frequentie verschuiven en ze gemakkelijk van de andere inertiële krachten te onderscheiden zijn. Concreet bestaat een vibrerende gyroscoop uit een opgehangen structuur die door een actuator in een bepaalde richting in resonantie gebracht wordt. Onder invloed van het Coriolis-effect, opgewekt door een rotatie rond een tweede richting, begint de structuur in de derde richting te trillen. Deze trilling wordt met een verplaatsingssensor geregistreerd. Een veel voorkomende structuur is de afgestemde vork, getoond in figuur 3.16.



Figuur 3.16: Een afgestemde vork als basisstructuur voor een vibrerende gyroscoop.

Het onderzoek naar vibrerende micro-gyroscoopen, die met de MEMS<sup>1</sup>-technologie van accelerometers gemaakt worden, is nog maar pas begonnen. Hierdoor hebben micro-gyroscoopen niet dezelfde maturiteit als micro-accelerometers en moeten er nog verscheidene problemen opgelost worden, waaronder de grote drift. Toch wordt grote vooruitgang geboekt en verbetert de resolutie elke twee jaar met een factor 10 [48]. Uit een recent overzicht van de stand van de techniek [48, 49] blijkt dat voorlopig enkel één- en twee-assige micro-gyroscoopen ontwikkeld zijn, maar dat drie-assige micro-gyroscoopen in de nabije toekomst verwacht worden.

Een aantal micro-gyroscoopen is reeds gecommmercialiseerd. Hun kostprijs ligt nog te hoog voor een computerpen. Een voorbeeld van een commercieel beschikbare, één-assige vibrerende gyroscoop is de ADXRS150 van Analog Devices. De sensor is samen met zijn signaalconditionering verpakt in een SMD<sup>2</sup>-verpakking met als afmetingen 7mm x 7mm x 3mm. De gyroscoop heeft een bereik van 150°/s en een niet-lineariteit van 0.1%. Zonder temperatuurscompensatie bedraagt de drift 16°/min/°C. Om het effect van de temperatuur software-matig te compenseren, is een ingebouwde temperatuurssensor voorzien. De prijs bedraagt 34€ (>500 stuks).

### c. Nauwkeurigheid

De nauwkeurigheid van gyroscoopen wordt beperkt door de foutenopstapeling tijdens de integratie. In Bijlage C.3.2 wordt de formule voor de foutenvoorplanting van een

<sup>1</sup>Micro-ElectroMechanical System

<sup>2</sup>Surface Mount Device

toevallige fout afgeleid. Hiervoor geldt:

$$\sigma_{\alpha} = t\sigma_{\dot{\alpha}} \quad (3.15)$$

met  $t$  de tijd,  $\sigma_{\alpha}$  en  $\sigma_{\dot{\alpha}}$  respectievelijk de spreiding op de hoek en de hoeksnelheid. De onzekerheid op de hoek neemt dus lineair in de tijd toe. Bovendien is de integratie van de hoeksnelheid zeer gevoelig voor een systematische fout. Deze zorgt voor een lineair toenemende drift volgens:

$$\Delta\alpha = t\Delta\dot{\alpha} \quad (3.16)$$

Oorzaken van deze toevallige en systematische fouten zijn bijvoorbeeld versnelingen en fluctuaties in de voedingsspanning en in de temperatuur. Met de huidige stand van de technologie is een stabiliteit van  $50^{\circ}/\text{uur}$  haalbaar voor vibrerende micro-gyroscoopen [67]. De hierboven vernoemde gyroscoop ADXRS150 heeft een temperatuursgevoeligheid van  $16^{\circ}/\text{min}/^{\circ}\text{C}$ . Een temperatuursverhoging van  $1^{\circ}\text{C}$  zorgt dus na één minuut reeds voor een fout van  $16^{\circ}$ . Door gebruik te maken van temperatuurscompensatie is deze fout terug te brengen tot  $1.2^{\circ}/\text{min}$  [68].

#### d. Besluit

De oriëntatie van een voorwerp kan onrechtstreeks gemeten worden door de integratie van de hoeksnelheid. Voor het meten van de hoeksnelheid zijn enkel vibrerende micro-gyroscoopen geschikt omdat de roterende en de optische gyroscoopen niet voldoende geminiaturiseerd kunnen worden. De nauwkeurigheid wordt voornamelijk beperkt door de drift van de gyroscoop. Een stabiliteit van  $50^{\circ}/\text{uur}$  is haalbaar. De micro-gyroscoopen zijn voorlopig enkel in één- en twee-assige uitvoeringen beschikbaar en hun kostprijs ligt nog te hoog voor de pentoepassing. In de toekomst kunnen vibrerende micro-gyroscoopen echter een veelbelovende methode voor het bepalen van de oriëntatie worden.

### 3.2.4 Onrechtstreekse oriëntatiemeting op basis van de hoekversnelling

#### a. Principe

De oriëntatie is onrechtstreeks te bepalen via de hoekversnelling. Hiervoor wordt de hoekversnelling eenmalig geïntegreerd tot de hoeksnelheid. Via het verband afgeleid in Bijlage C.3.1, kunnen de tijdsafgeleiden van de Eulerhoeken uit de hoeksnelheid berekend worden. Vervolgens is een tweede integratie vereist om de Eulerhoeken te bekomen. Door de dubbele integratie zijn er twee integratieconstanten, namelijk de hoeksnelheid op tijdstip 0 en de beginoriëntatie op tijdstip 0. Deze constanten worden bijvoorbeeld vastgelegd door de computerpen voor het schrijven in een houder op het bureau te plaatsen.

#### b. Sensoren

De hoekversnelling is meetbaar door twee identieke lineaire accelerometers op een afstand van elkaar. Deze accelerometers meten de versnelling in het voorwerp-assen-

stelsel. Met behulp van de transformatiematrix  $R_{ZYZEuler}$  wordt de versnelling in het vast assenstelsel bekomen. De versnellingen  $\vec{a}_{S1}$  en  $\vec{a}_{S2}$  zijn gelijk aan:

$$\begin{aligned}\vec{a}_{S1} &= \vec{a}_P + \vec{\alpha} \wedge \vec{r}_1 + \dot{\vec{\alpha}} \wedge (\vec{\alpha} \wedge \vec{r}_1), \\ \vec{a}_{S2} &= \vec{a}_P + \vec{\alpha} \wedge \vec{r}_2 + \dot{\vec{\alpha}} \wedge (\vec{\alpha} \wedge \vec{r}_2),\end{aligned}\quad (3.17)$$

met  $\vec{a}_P$  de versnelling van de penpunt,  $\vec{\alpha}$  de hoekversnelling,  $\dot{\vec{\alpha}}$  de hoeksnelheid,  $\vec{r}_1$  en  $\vec{r}_2$  respectievelijk de afstand gaande van de penpunt tot de eerste of tweede accelerometer. Door het verschil te maken van beide signalen bekomt men:

$$\vec{a}_{S2} - \vec{a}_{S1} = \dot{\vec{\alpha}} \wedge (\vec{r}_1 - \vec{r}_2) + \vec{\alpha} \wedge (\dot{\vec{\alpha}} \wedge (\vec{r}_1 - \vec{r}_2)). \quad (3.18)$$

Hieruit kan  $\dot{\vec{\alpha}}$  berekend worden, rekening houdend met de hoeksnelheid  $\vec{\alpha}$  uit de vorige stap. Opdat de resolutie hoog zou zijn, moet de afstand  $r_2 - r_1$  groot zijn.

Deze methode laat niet toe om de hoekversnelling evenwijdig met  $\vec{r}_2 - \vec{r}_1$  te meten, aangezien het vectorieel product tussen deze component en  $\vec{r}_2 - \vec{r}_1$  steeds nul is. Om deze component te meten is een derde accelerometer nodig die uit het centrum van de pen staat. Vanwege de beperkte diameter van een pen is de afstand van deze derde accelerometer tot het centrum van de pen echter beperkt, waardoor de vergelijkingen slecht geconditioneerd zijn.

Micro-accelerometers zijn reeds besproken in paragraaf 3.2.1.

### c. Nauwkeurigheid

De nauwkeurigheid wordt voornamelijk beperkt door de foutenopstapeling tijdens de dubbele integratie. Neem het vereenvoudigde geval van een twee-dimensionale beweging. De vergelijking herleiden zich dan tot:

$$\begin{aligned}\ddot{\alpha} &= (a_{S2} - a_{S1})/R_{S1,S2}, \\ \alpha &= \int \int \ddot{\alpha} dt + t\dot{\alpha}_0 + \alpha_0,\end{aligned}\quad (3.19)$$

met  $R_{S1,S2}$  de afstand tussen beide accelerometers. De spreiding op de dubbele tijdsafgeleiden plant zich voort volgens:

$$\sigma_\alpha = \frac{t^2}{2} \sigma_{\ddot{\alpha}}, \quad (3.20)$$

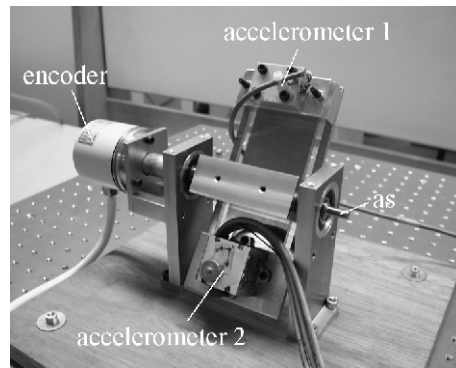
met  $t$  de tijd en  $\sigma_\alpha$  en  $\sigma_{\ddot{\alpha}}$  respectievelijk de spreiding op de hoek  $\alpha$  en zijn dubbele tijdsafgeleide. Deze formule toont aan dat de onzekerheid op de Eulerhoeken kwadratisch met de tijd toeneemt. Hetzelfde gebeurt met een systematische fout:

$$\Delta\alpha = t^2 \Delta\ddot{\alpha}, \quad (3.21)$$

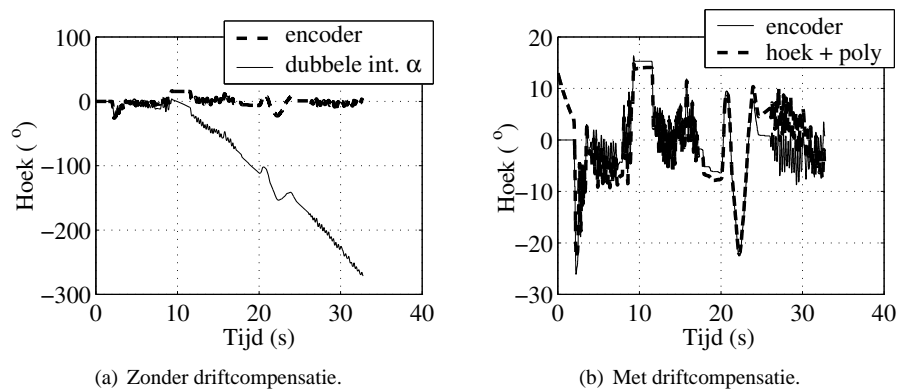
met  $t$  de tijd,  $\Delta\alpha$  en  $\Delta\ddot{\alpha}$  respectievelijk de systematische fout op de hoek en zijn dubbele tijdsafgeleide. De afleiding van beide formules staat in Bijlage C.4.2. Door deze kwadratische toename van de fout, is de tijdsduur waarover geïntegreerd kan worden beperkt.

Geysen en Cosemans [29] hebben de grootte van deze foutenopstapeling experimenteel bepaald voor een rotatie in een vlak. Figuur 3.17 toont de proefopstelling.





Figuur 3.17: Proefopstelling voor het bepalen van de fout op de dubbele integratie van de hoekversnelling [29].



Figuur 3.18: Nauwkeurigheid van de dubbele integratie hoekversnelling.

Twee servo-accelerometers (SUNDSTRAND Mini-Pal Model 2180) zijn op een roterende as gemonteerd op een afstand van 133mm van elkaar. Deze accelerometers zijn kwalitatief beter dan de commercieel beschikbare micro-accelerometers, zodat de bekomen fout een ondergrens vormt. De as is voorzien van een absolute encoder (Hengstler type RA58) voor de referentiemeting van de hoekrotatie. Het experiment, getoond in figuur 3.18, bestaat uit het over en weer roteren van de as. Zoals reeds aangehaald, vertoont de dubbel geïntegreerde hoekversnelling een sterke (kwadratische) drift. Deze drift is compenseerbaar indien de drift geschat kan worden. Deze schatting is gebaseerd op een polynoom die door de dubbel geïntegreerde hoekversnelling gefit wordt. Figuur 3.18(b) toont het resultaat. De kwadratische drift is verwijderd, maar de nauwkeurigheid van de berekende hoek blijft beperkt. Een andere mogelijkheid om de drift te compenseren maakt gebruik van een hoogdoorlaatfilter. Deze filter verwijdert

echter ook de DC waarde, zodat deze techniek niet bruikbaar is voor het meten van de oriëntatie.

#### d. Besluit

De dubbele integratie van de hoekversnelling geeft de oriëntatie van de sensor. Deze hoekversnelling wordt uit het differentiële signaal van twee accelerometers berekend. Aangezien de afstand tussen deze accelerometers zo groot mogelijk moet zijn, is deze methode in het geval van een dunne cilindrische pen ongeschikt voor het bepalen van de spinhoek  $\psi$ . De analyse van de foutenvoortplanting en de testen tonen aan dat de dubbele integratie van de hoekversnelling een kwadratische drift vertoont, waardoor de nauwkeurigheid van deze methode zeer beperkt is.

### 3.2.5 Keuze meetprincipe

Voor het meten van de oriëntatie in een niet-gestructureerde omgeving bestaan er vier basisprincipes, gebaseerd op de zwaartekracht, het aardmagnetisch veld, de integratie van de hoeksnelheid of de dubbele integratie van de hoekversnelling. Hierbij is het principe op basis van de hoeksnelheid niet toepasbaar omdat drie-assige micro-gyroscopen nog niet bestaan en het samenbouwen van drie één-assige micro-gyroscopen het voorziene budget overschrijdt. Bovendien is de drift van de huidige micro-gyroscopen nog groot, waardoor de integratietijd beperkt is. De dubbele integratie van de hoekversnelling geeft eveneens een cumulatieve fout, waardoor het principe enkel over een zeer korte tijd nauwkeurig is. De twee overige principes, gebaseerd op de zwaartekracht en het aardmagnetisch veld, vertonen geen cumulatieve fout. Geen van beide principes is echter in staat om apart de volledige oriëntatie van de pen te bepalen. Daarom wordt geopteerd voor een combinatie van beide principes. De oriëntatiesensor bestaat dus uit een configuratie van een zwaartekrachtsensor en een magnetische sensor. De eerste sensor meet de elevatiehoek  $\theta$  en de spinhoek  $\psi$ , terwijl de tweede sensor de azimuthhoek  $\varphi$  meet.

Bovenstaande analyse toont tevens aan dat de nauwkeurigheid van deze oriëntatiesensor fundamenteel beperkt is. De sensor die de zwaartekracht meet, is namelijk gevoelig voor versnellingen. Schrijfproeven tonen aan dat deze versnellingen minimaal zijn op 80mm van de penpunt. Toch zal een accelerometer op deze plaats een spreiding van  $2.1^\circ$  op  $\theta$  en  $3.7^\circ$  op  $\psi$  geven. Door de tekst langzaam te schrijven, kan deze spreiding verminderd worden. Hierdoor is de nauwkeurigheid van de schrijffase ( $1^\circ$ ) haalbaar, maar de nauwkeurigheid van de luchtfase ( $0.02^\circ$ ) zal nooit gerealiseerd worden. Het bepalen van de beweging in de lucht op basis van een drie-assige accelerometer en een oriëntatiesensor is dus niet mogelijk. Bijgevolg wordt verder in dit werk enkel de schrijffase uitgewerkt. De drie-assige accelerometer zal hierdoor niet behandeld worden.

Voor het meten van de richting van de zwaartekracht wordt geopteerd voor een twee-assige accelerometer. De verminderde gevoeligheid van deze sensor weegt immers niet op tegen de hogere kostprijs van een drie-assige accelerometer. Bij de magnetische sensor is de keuze minder evident. Het alternatief met de twee-assige magnetische sensor vereist de kennis van de z-component van het aardmagnetisch veld,

waardoor de gebruiker eerst dit veld moet opmeten voordat hij begint te schrijven. Een drie-assige magnetische sensor heeft deze beperking niet en is daarom vanuit gebruikersgemak te verkiezen. Daartegenover staat de hogere kostprijs en grootte van een drie-assige magnetische sensor. De keuze tussen twee of drie assen blijft daarom open tot bij de bespreking van de magnetische sensor in paragraaf 3.3.2.

Tabel 3.3 geeft de vereiste specificaties van de accelerometer en de magnetische sensor. De lengte-specificatie wordt in twee gedeeld, aangezien de oriëntatiesensor eigenlijk uit twee sensoren bestaat. De prijs van 10€ per sensor blijft echter behouden. Dit is te verantwoorden door het wegvallen van de luchtfase, waardoor er geen bijkomende drie-assige accelerometer nodig is. Om de accelerometer te beschermen tegen schokken, moet hij voorzien zijn van eindstoppen, die de beweging van de massa beperken. Voor de magnetische sensor bestaan er alternatieven zonder bewegende onderdelen, die niet gevoelig zijn voor schokken.

Tabel 3.3: Specificaties van de accelerometer en de magnetische sensor.

	$\vec{g}$	$\vec{B}$
type	accelerometer	Hall of magneto-resistief
aantal assen	2	2 of 3
afmetingen		
- max. diameter	12mm	12mm
- max. lengte	5mm	5mm
nauwkeurigheid ( $2\sigma$ )	0.013g	8 $\mu$ T
omgevingsinvloeden		
- lichte schokken	eindstoppen	geen bewegende onderdelen
- temperatuursvariatie	20 $\pm$ 20°C	20 $\pm$ 20°C
frequentiebereik	0...10Hz	0...10Hz
kostprijs	10€	10€

## 3.3 Ontwerp

### 3.3.1 Accelerometer

Speciaal voor het meten van de oriëntatie van een computerpen is een twee-assige optische accelerometer ontwikkeld. De resultaten van dit onderzoek staan in Bijlage D. Deze sensor is echter achterhaald door de snel evoluerende stand van de techniek inzake accelerometers. Tegenwoordig bestaat er een uitgebreid aanbod van commercieel beschikbare micro-accelerometers.

Een mogelijke accelerometer is de ADXL202 van Analog Devices. Het werkingsprincipe van deze accelerometer is reeds in paragraaf 3.2.1 besproken. Tabel 3.4 somt zijn specificaties op. De sensor voldoet aan alle specificaties voor de oriëntatiesensor, behalve de kostprijs en de afmetingen. Recent is echter een nieuwe versie uitgebracht, namelijk de ADXL202E, die kleiner en goedkoper is. De afmetingen van deze nieuwe

versie bedragen 5mm x 5mm x 2mm en de sensor kost 9.09€ bij aankoop van 1000 stuks. De overige specificaties blijven behouden.

Tabel 3.4: Specificaties van de ADXL202.

bereik	$\pm 2g$
resolutie	0.005g
gevoeligheid	12.5% Duty cycle /g
niet-lineariteit	0.2% van het bereik
frequentiebereik	DC ... 6kHz
temperatuursbereik	$0^\circ \dots 70^\circ$
maximale schok	1000g
uitlijningsfout met behuizing	$\pm 1^\circ$
uitlijningsfout tussen X-as en Y-as	$\pm 0.01^\circ$
afmetingen	10.6mm x 9.9mm x 5.5mm
kostprijs (>1000)	12.12€

### 3.3.2 Magnetische sensor

Goedkope magnetische micro-sensoren voor het meten van het aardmagnetisch veld zijn commercieel beschikbaar. De HMC-reeks van Honeywell bevat onder andere een twee-assige en een drie-assige magnetische sensor, namelijk de HMC1022 en de HMC1023. Beide sensoren zijn gebaseerd op het magneto-resistief effect. Hun eigenschappen zijn opgesomd in tabel 3.5. Aangezien de HMC1023 het voorziene budget ver overschrijdt, zal het prototype met de twee-assige HMC1022 uitgerust worden. Hierdoor is een bijkomende kalibratie van het lokaal aardmagnetisch veld door de gebruiker vereist.

Tabel 3.5: Eigenschappen van de magnetische sensor HMC1022 en HMC1023.

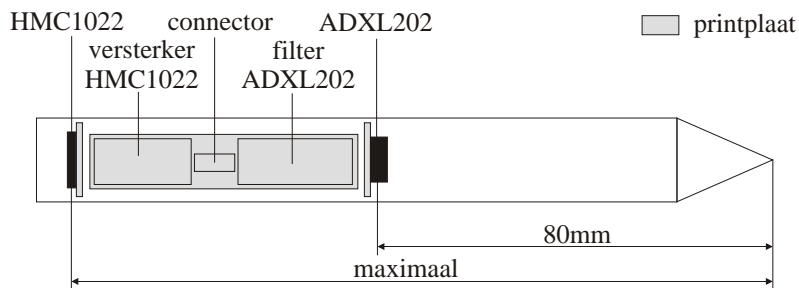
	HMC1022	HMC1023
bereik	$\pm 600\mu T$	$\pm 600\mu T$
resolutie (10Hz filter)	8.5nT	8.5nT
gevoeligheid (5V voeding)	0.05 mV/ $\mu T$	0.05 mV/ $\mu T$
niet-lineariteit	0.05% van bereik	0.05% van bereik
frequentiebereik	DC ... 5MHz	DC ... 5MHz
temperatuursbereik	$-55^\circ \dots 150^\circ$	$-40^\circ \dots 150^\circ$
uitlijningsfout		$\pm 1^\circ$
afmetingen (mm)	11.3 x 6.2 x 1.7	8.1 x 3.8 x 4.1
kostprijs	8.18€	68 €

Recent heeft Honeywell een verkleinde versie van de HMC1022 uitgebracht onder de naam HMC1052. Deze chip meet 5.05mm x 3.10mm x 1.10mm. Het bereik, de gevoeligheid, het frequentiebereik en de kostprijs blijven hetzelfde. Alhoewel de

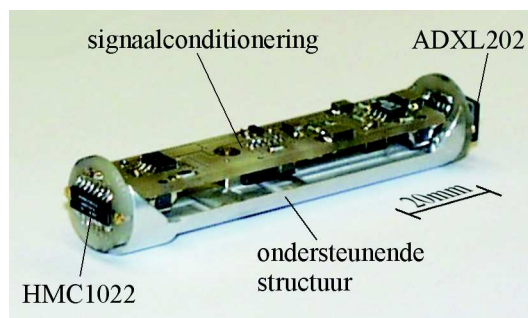
resolutie daalt naar 12nT en de niet-lineariteit stijgt tot 0.1%, blijft de nauwkeurigheid voldoende. In de nabije toekomst wordt een verder geminiaturiseerde sensor uitgebracht onder de naam HMC1052L. Deze sensor zal 3mm x 3mm x 0.9mm meten.

### 3.3.3 Samenbouw oriëntatiesensor

Figuur 3.19 toont het prototype van de oriëntatiesensor, die bestaat uit de twee-assige accelerometer ADXL202 en de twee-assige magnetische sensor HMC1022. Beide sensoren zijn loodrecht op de lengteas van de pen gemonteerd. Hierbij is de optimale positie van de accelerometer op 80mm van de penpunt om de invloed van de penbeweging op de sensor te beperken. De magnetische sensor zit bij voorkeur op het uiteinde van de computerpen, waardoor de afstand tot het tafelblad maximaal is en de invloed van metalen voorwerp op of onder het tafelblad minimaal is. Door dit verschil in optimale plaats, bevinden beide sensoren zich op een afstand van elkaar. Hierdoor zijn er twee ronde printplaten nodig om beide sensoren te monteren. Deze twee printplaten zijn op het uiteinde van een aluminium bus bevestigd, zodat de onderlinge uitlijning van beide sensoren gegarandeerd is. Aangezien de ronde printplaten te klein zijn voor alle signaalconditioning, is een derde printplaat in de langsrichting van de computerpen voorzien. Het geheel heeft een diameter van 16mm en een lengte



(a) Principeschets.



(b) Foto.

Figuur 3.19: Prototype oriëntatiesensor.

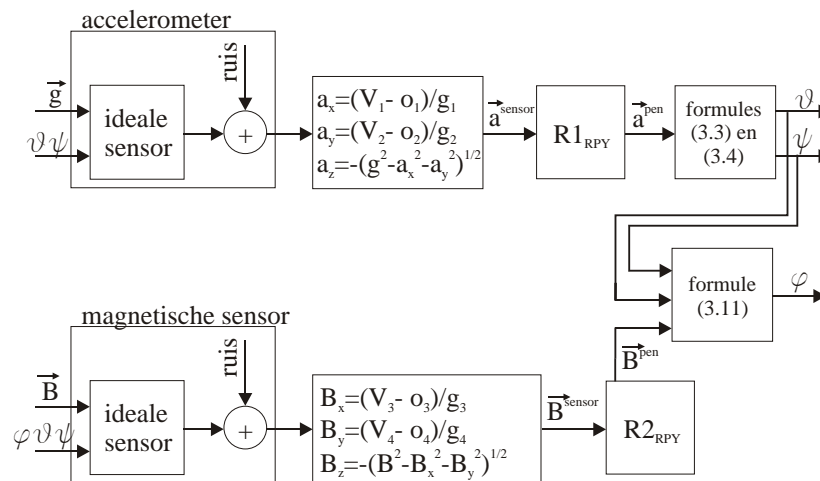
van 82mm.

De elektronica op de derde printplaat bevat de signaalconditionering van de accelerometer ADXL202 en de magnetische sensor HMC1022. Bijlage E geeft de elektrische schema's van deze elektronica weer.

- De signaalconditionering van de ADXL202 bestaat uit een laagdoorlaat-filter (Butterworth, 4e orde, 160Hz). Deze filter zet het digitaal pulsbreedte-gemoduleerde signaal van de ADXL202 om naar een analogoog signaal dat door de meetkaart ingelezen wordt. Deze omzetting is noodzakelijk omdat de beschikbare meetkaarten het pulsbreedte-gemoduleerde signaal niet rechtstreeks kunnen meten. In het uiteindelijke commerciële product zou de ADXL202 rechtstreeks op een controller aangesloten kunnen worden, waardoor deze filter overbodig wordt.
- De signaalconditionering van de HMC1022 bestaat uit een actieve versterker met een versterkingsfactor van 370. Tevens zorgt deze versterker voor de onderdrukking van de hoogfrequente ruis (1e orde, 100Hz).

### 3.3.4 Algoritme

Figuur 3.20 toont de berekeningsmethode van de hoeken  $\varphi$ ,  $\theta$  en  $\psi$  uit de signalen van de accelerometer ADXL202 en de magnetische sensor HMC1022.



Figuur 3.20: Berekening van de hoeken  $\varphi$ ,  $\theta$  en  $\psi$ .

Eerst wordt de projectie van de versnelling op het sensor-assenstelsel berekend. De x- en y-componenten van deze projectie kunnen rechtstreeks uit de signalen van de ADXL202 berekend worden. Aangezien de ADXL202 een hoge lineariteit en een

lage kruisgevoeligheid heeft, volstaat een lineair verband:

$$\begin{aligned} a_x &= (V_1 - o_1)/g_1, \\ a_y &= (V_2 - o_2)/g_2, \end{aligned} \quad (3.22)$$

met  $(a_x, a_y)$  de x- en y-component van de versnelling in het sensor-assenstelsel,  $(V_1, V_2)$  het gefilterde signaal van de ADXL202,  $(o_1, o_2)$  de offsets op deze signalen en  $(g_1, g_2)$  de gevoeligheid van beide kanalen van de ADXL202. De derde component  $a_z^{sensor}$  wordt geschat op basis van de totale zwaartekracht  $g$  en de twee gekende projecties  $a_x^{sensor}$  en  $a_y^{sensor}$  volgens:

$$a_z^{sensor} = \sqrt{g^2 - (a_x^{sensor})^2 - (a_y^{sensor})^2}. \quad (3.23)$$

Vervolgens worden de uitlijningsfouten van de accelerometer ten opzicht van het pen-assenstelsel in rekening gebracht met behulp van transformatiematrix  $R1_{RPY}$ . Daar deze uitlijningsfouten klein zijn, moet hiervoor de RPY-hoekconventie gebruikt worden. Tot slot worden de hoeken  $\theta$  en  $\psi$  berekend volgens formules (3.3) en (3.4).

De berekening van de hoek  $\varphi$  verloopt analoog. De signalen  $V_3$  en  $V_4$  van de magnetische sensor worden met een lineair verband omgezet naar de projectie van het magnetisch veld op het sensor-assenstelsel volgens:

$$\begin{aligned} B_x &= (V_3 - o_3)/g_3, \\ B_y &= (V_4 - o_4)/g_4, \end{aligned} \quad (3.24)$$

met  $(B_x, B_y)$  het magnetisch veld in het sensor-assenstelsel van de HMC1022,  $(V_3, V_4)$  de signalen van de HMC1022,  $(o_3, o_4)$  de offsets op deze signalen en  $(g_3, g_4)$  de gevoeligheden van de kanalen van de HMC1022. De derde component van het magnetisch veld wordt geschat op basis van het totaal magnetische veld en de twee gemeten componenten in x- en y-richting volgens:

$$B_z = \sqrt{B^2 - B_x^2 - B_y^2}, \quad (3.25)$$

met  $B$  de totale magnetische veldsterkte,  $(B_x, B_y)$  de x- en y-component van het magnetisch veld volgens het sensor-assenstelsel. Vervolgens wordt de uitlijning van het sensor-assenstelsel ten opzichte van het pen-assenstelsel in rekening gebracht met behulp van een tweede transformatiematrix  $R2_{RPY}$ . In de laatste stap wordt de azimuthhoek  $\psi$  berekend met formule (3.11), rekening houdend met de reeds berekende hoeken  $\theta$  en  $\psi$ .

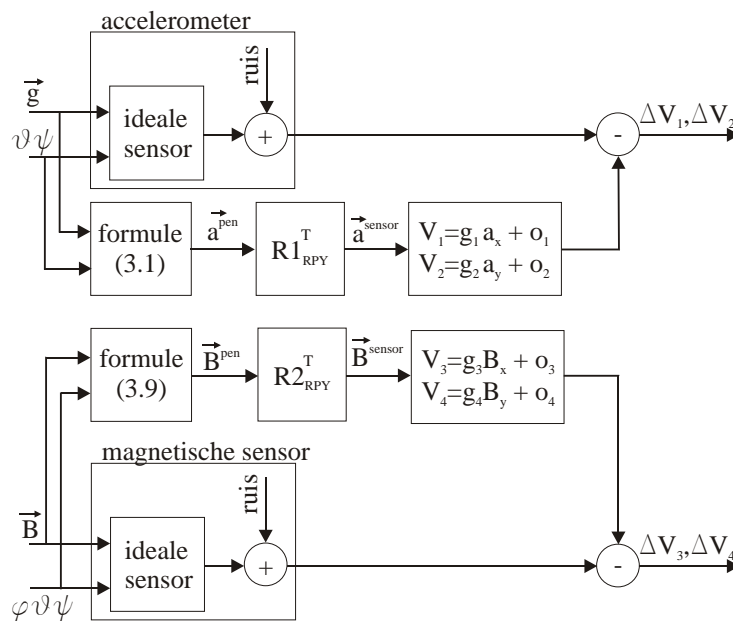
Dit schema bevat veertien parameters, namelijk de gevoeligheid en offset van elke as (4 assen x 2 parameters) en tweemaal drie uitlijningsfouten. Deze parameters variëren van exemplaar tot exemplaar. Zo varieert de gevoeligheid van de ADXL202 bijvoorbeeld tussen 10%/g en 15%/g. Daarom is het noodzakelijk dat elke oriëntatiesensor individueel gekalibreerd wordt. Aangezien de signaalconditionering en de montage een invloed op de parameters uitoefenen, gebeurt deze kalibratie nadat de oriëntatiesensor geassembleerd en gemonteerd is.

## 3.4 Kalibratie

### 3.4.1 Principe

De kalibratie van de oriëntatiesensor gebeurt door de sensor in verschillende gekende referentie-oriëntaties te plaatsen. Deze referentie-oriëntaties zijn gelijkmatig verspreid over het hele meetbereik. Op basis van deze metingen worden de onbekende parameters geschat door minimalisatie van een foutencriterium.

Er bestaan verschillende foutencriteria. Een eerste mogelijkheid is het minimaliseren van de som van het kwadratisch verschil tussen de referentie-hoeken en de hoeken berekend met het schema van figuur 3.20. Bij dit criterium wordt echter de ruis op de sensorsignalen gekleurd door de niet-lineaire operatoren (sinussen en cosinussen), waardoor de onzekerheid op de berekende hoeken verschilt van meting tot meting. Aangezien het optimalisatie-algoritme van een stochastisch verdeelde onzekerheid op alle metingen uitgaat, wordt de meetfout op sommige metingen sterker onderdrukt dan bij andere metingen. Dit resulteert in een niet-optimale schatting van de parameters. Figuur 3.21 toont een ander foutencriterium dat bovengenoemd nadeel niet vertoont. Het foutencriterium is gebaseerd op de som van het kwadratisch verschil tussen de gemeten sensorsignalen en de - op basis van de referentie-oriëntatie - berekende sensorsignalen. De ruis op de sensorsignalen is een rechtstreekse term in het foutencriterium, waardoor de ruis niet gekleurd wordt. Daarom is voor dit foutencriterium geopteerd.



Figuur 3.21: Het tweede foutencriterium.



Door de niet-lineaire operatoren (sinus en cosinus) is het foutencriterium niet lineair in zijn parameters. Voor het minimaliseren van een niet-lineair criterium wordt standaard het Gauss-Newton algoritme gebruikt. Dit algoritme zoekt iteratief naar het optimum, door telkens de steilste helling te berekenen en vervolgens via deze helling het minimum van het foutencriterium te zoeken. In dit lijn-minimum, berekent het algoritme weer de steilste helling en het minimum in deze richting. Een wiskundige beschrijving van dit algoritme is te vinden in [69].

### 3.4.2 Kalibratiestand

Een kalibratiestand is speciaal ontworpen om de oriëntatiesensor in een willekeurige referentie-oriëntatie te plaatsen. Deze referentie-oriëntatie wordt gekenmerkt door drie onafhankelijke hoeken, gedefinieerd volgens de ZYZ-Eulerconventie. Elke hoek moet met een nauwkeurigheid van  $0.1^\circ$  gemeten worden. Een manuele instelling van de hoeken volstaat, zodat een gestuurde aandrijving niet vereist is. Verder mag de kalibratiestand het aardmagnetisch veld niet verstoren om de kalibratie van de magnetische sensor niet te beïnvloeden.

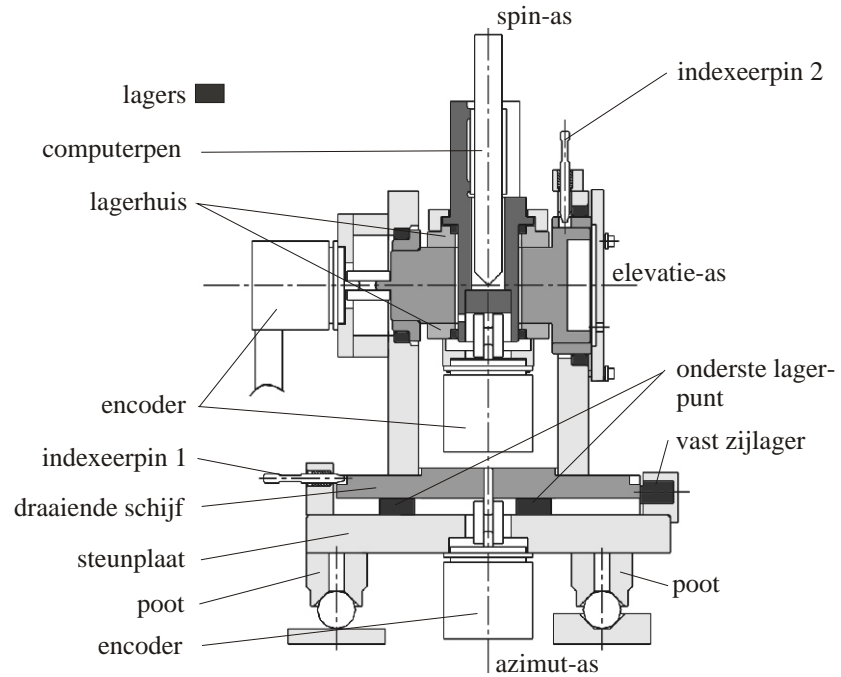
Figuur 3.22(a) toont een doorsnede van de kalibratiestand. Aangezien de oriëntatiesensor volgens drie onafhankelijke ZYZ-Eulerhoeken ingesteld moeten worden, is de kalibratiestand opgebouwd uit drie loodrecht op elkaar staande assen: de azimut-as, de elevatie-as en de spin-as. In overeenstemming met de ZYZ-Eulerconventie draait de elevatie-as met de azimut-as mee en draait de spin-as met de azimut-as en de elevatie-as mee. Elke as is uitgerust met een absolute encoder (RA58 van Hengstler), die een nauwkeurigheid van  $0.1^\circ$  heeft. Verder is elke as van een indexeerpin voorzien om een beperkt aantal hoeken met een hoge repeteerbaarheid in te stellen.

Figuur 3.22(b) toont het concept van de azimut-as. Deze as staat verticaal en bestaat uit een draaiende schijf die op drie lagerpunten ondersteund is. Deze drie lagerpunten nemen twee rotatievrijheidsgraden en de translatievrijheidsgraad in de verticale richting weg. In het horizontale vlak duwt het verend lager de schijf tegen twee vaste zijlagers, waardoor de translatievrijheidsgraden in het horizontale vlak vastgelegd worden.

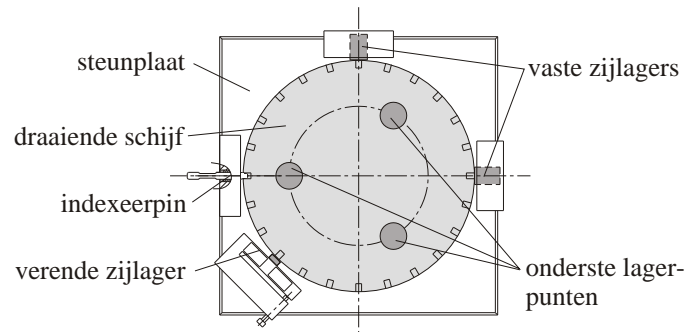
De elevatie-as staat loodrecht op de azimut-as en roteert met de draaiende schijf mee. Figuur 3.22(a) toont het concept. De as is met twee glijlagers gelagerd. De lengte van deze glijlagers is beperkt zodat elk glijlager slechts twee vrijheidsgraden wegneemt. De vijfde vrijheidsgraad wordt weggenomen door een kraag op de as, die tegen de zijkant van het linkse glijlager gedrukt wordt. De positie van de glijlagers in het horizontale vlak is ten opzichte van de roterende schijf regelbaar, opdat de azimut-as en de elevatie-as elkaar zouden snijden.

De spin-as staat loodrecht op de elevatie-as en draait met de twee vorige rotaties mee. Analoog aan de elevatie-as, is deze as met twee glijlagers gelagerd. Deze glijlagers zijn bevestigd in twee lagerhuizen, waarvan de positie ten opzichte van de elevatie-as in axiale en tangentiële richting regelbaar is. Op die manier kan de spin-as bijgeregeld worden, zodat hij de twee vorige assen in één punt snijdt. Verder is deze as voorzien van een referentie-vlak en drie steunpunten, zodat een eenduidige montage van de oriëntatiesensor mogelijk is.

Het geheel staat met drie poten op een vlaktafel. Hierbij zorgt het concept van



(a) Zijaanzicht kalibratiestand.



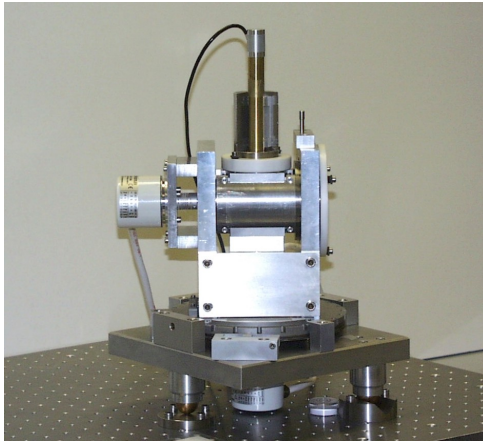
(b) Bovenaanzicht van de azimut-as.

Figuur 3.22: Kalibratiestand voor instellen ZYZ-Eulerhoeken.

deze poten voor het eenduidig vastleggen van de zes vrijheidsgraden van het geheel. De vlaktafel heeft op zijn beurt drie in hoogte verstelbare poten, zodanig dat de kalibratiestand waterpas gezet kan worden.

Bij de materiaalkeuze is het belangrijk dat het aardmagnetisch veld niet gestoord wordt. Daarom zijn alle lagers gemaakt uit olie-houdend brons. De overige onderdelen bestaan uit aluminium en roestvrij staal. Ook de encoders zijn gemaakt uit aluminium en roestvrij staal.

Figuur 3.23 toont de geassembleerde kalibratiestand. Na montage worden twee zaken bijgesteld, namelijk de loodrechtheid van de drie rotatie-assen en het snijden van de drie rotatie-assen in één enkel punt. Bijlage F gaat dieper in op deze bijregeling. Na deze bijregeling is de afwijking van de loodrechtheid kleiner dan de resolutie van de encoders ( $0.1^\circ$ ) en snijden de drie rotatie-assen elkaar in één punt binnen een nauwkeurigheid van  $70\mu\text{m}$ .



Figuur 3.23: De kalibratiestand voor de oriëntatiesensor.

### 3.4.3 Kalibratie van de oriëntatiesensor

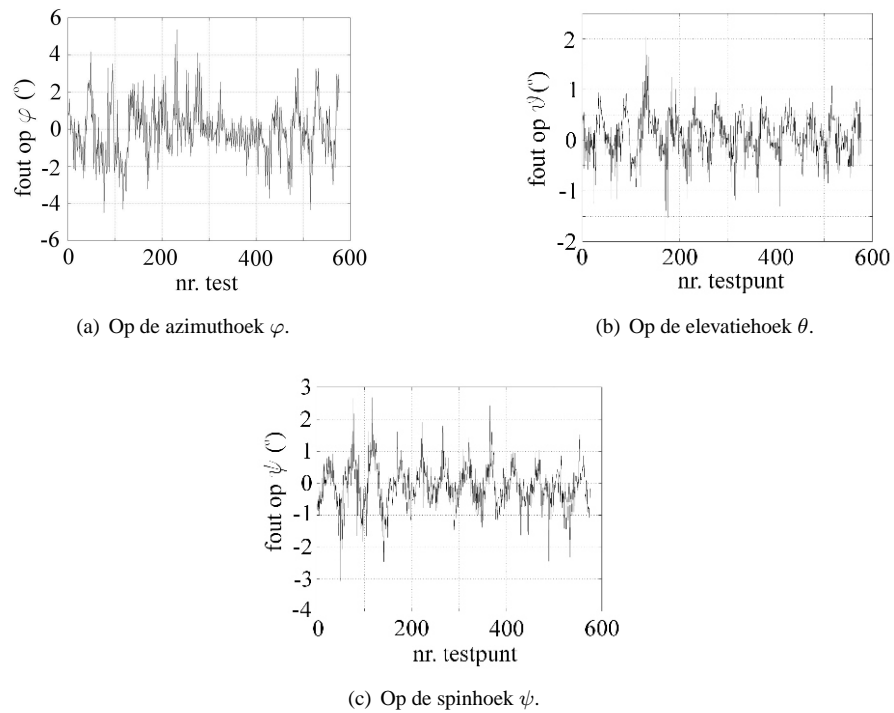
De kalibratie van de oriëntatiesensor bestaat uit twee delen. Eerst wordt een experiment gedaan, waarbij de sensor in verschillende oriëntaties geplaatst wordt. Met dit experiment worden de onbekende parameters geïdentificeerd. Vervolgens wordt het experiment herhaald. Met de nieuwe dataset en de parameters uit het eerste experiment wordt de oriëntatie berekend en vergeleken met de referentie-oriëntaties. Het verschil bepaalt de uiteindelijke nauwkeurigheid van de oriëntatiesensor.

Concreet wordt de oriëntatiesensor in 576 oriëntaties geplaatst. Dit komt overeen met alle combinaties van 12 azimuthhoeken, 4 elevatiehoeken en 12 spinhoeken. In elke oriëntatie werden 20 datapunten aan 1000Hz gemeten. Met deze data worden de onbekende parameters geïdentificeerd. Tabel 3.6 somt de geïdentificeerde parameters op.

Tabel 3.6: De geïdentificeerde parameters.

	ADXL202	HMC1022
gevoeligheid x-as	$g_1=1.211\text{V/g}$	$g_3=0.7120\text{V/B}$
gevoeligheid y-as	$g_2=1.203\text{V/g}$	$g_4=0.6707\text{V/B}$
offset x-as	$o_1=3.6341\text{V}$	$o_3=3.2872\text{V}$
offset y-as	$o_2=2.4801\text{V}$	$o_4=2.9050\text{V}$
uitlijning $\theta_e$	$0.16^\circ$	$0.32^\circ$
uitlijning $\varphi_e$	$-0.69^\circ$	$2.86^\circ$
uitlijning $\psi_e$	$-5.55^\circ$	$-0.63^\circ$

B is de absolute grootte van het lokaal aardmagnetisch veld



Figuur 3.24: Resterende fouten op oriëntatiesensor.

Voor het bepalen van de nauwkeurigheid wordt het experiment herhaald. Om de ruis te onderdrukken, wordt een gemiddelde genomen van 20 metingen in dezelfde oriëntatie. Met deze tweede dataset worden de hoeken berekend, gebruik makend van de parameters die in de eerste proef bepaald zijn. Figuur 3.24 toont de afwijking van deze hoeken met de referentie-oriëntatie. De spreiding op de fouten bedraagt  $0.69^\circ$  voor de spinhoek,  $0.45^\circ$  voor de elevatiehoek en  $1.41^\circ$  voor de azimuthhoek. De

oriëntatiesensor haalt dus de vereiste nauwkeurigheid.

### 3.5 Besluit

Voor het meten van de oriëntatie in een niet-gestructureerde omgeving bestaan vier meetprincipes.

- Het eerste meetprincipe bepaalt de oriëntatie op basis van de richting van de zwaartekracht. De nauwkeurigheid van dit principe wordt fundamenteel beperkt door de versnellingen waaraan een pen onderhevig is. Deze versnellingen zijn immers fysisch niet te onderscheiden van de zwaartekracht. De grootte van deze versnellingen varieert met de positie in de pen: op 80mm van de penpunt zijn ze minimaal. De versnelling bedraagt daar nog  $0.38\text{m/s}^2$ , waardoor de spreiding op de elevatiehoek en de spinhoek respectievelijk  $2.1^\circ$  en  $3.7^\circ$  bedraagt. Door de tekst langzaam te schrijven, zijn deze fouten verder te reduceren.
- Het tweede meetprincipe is gebaseerd op het meten van de richting van het aardmagnetisch veld. De nauwkeurigheid van dit principe is fundamenteel beperkt door lokale vervormingen van het aardmagnetisch veld. Bij afwezigheid van magneten, metalen voorwerpen en elektrische apparaten in de onmiddellijke omgeving van de pen, is een nauwkeurigheid van  $2^\circ$  haalbaar. Bij bureau's met metalen onderdelen loopt de fout op tot  $0.1^\circ/\text{mm}$ .
- Bij het derde meetprincipe wordt de oriëntatie bepaald door de integratie van de hoeksnelheid, opgemeten door een drie-assige gyroscoop. Drie-assige microgyroscopen zijn echter nog volop in ontwikkeling en het samenbouwen van drie één-assige gyroscopen is nog te duur. Micro-gyroscopen bieden echter een veelbelovende toekomst.
- Het vierde meetprincipe bepaalt de oriëntatie op basis van de dubbele integratie van de hoekversnelling. Deze methode heeft net als de gyroscopen een in de tijd toenemende fout. Experimenten tonen aan dat dit meetprincipe slechts over een zeer korte periode bruikbaar is.

De gekozen oriëntatiesensor is een combinatie van een zwaartekrachtsensor en een magnetische sensor. Deze combinatie is in staat de specificaties van de schrijffase te halen op voorwaarde dat de tekst langzaam geschreven wordt en er geen magneten en metalen voorwerpen in de onmiddellijke omgeving van de pen bevinden. De vereiste nauwkeurigheid van de luchtfase is echter niet haalbaar. In dit werk wordt daarom *enkel een computerpen met een schrijffase uitgewerkt*.

Voor de zwaartekrachtsensor is geopteerd voor de commercieel verkrijgbare capacitive accelerometer ADXL202 van Analog Devices. Voor de magnetische sensor is geopteerd voor de commercieel verkrijgbare, twee-assige, magneto-restrictieve sensor HMC1022 van Honeywell. Doordat de sensor slechts twee assen heeft, moet de gebruiker eerst het lokale magnetische veld opmeten. De uiteindelijke oriëntatiesensor bestaat dus uit een combinatie van de ADXL202 en HMC1022. Zowel van de ADXL202 als de HMC1022 is recent een kleinere versie uitgebracht, zodanig dat in de toekomst de oriëntatiesensor verder geminiaturiseerd kan worden.

De oriëntatiesensor is gekalibreerd door hem in verschillende gekende referentie-oriëntaties te plaatsen. Hiervoor is een kalibratiestand met een nauwkeurigheid van  $0.1^\circ$  gebouwd, die het aardmagnetisch veld niet beïnvloedt. Na kalibratie bedraagt de spreiding op de hoeken  $0.69^\circ$  voor de spinhoek,  $0.45^\circ$  voor de elevatiehoek en  $1.41^\circ$  voor de azimuthhoek. De oriëntatiesensor haalt dus de vereiste nauwkeurigheid.

## Hoofdstuk 4

# Krachtsensor

*In dit hoofdstuk is een drie-assige miniatuurkrachtsensor ontwikkeld, die de contactkrachten tussen penpunt en papier meet. Het hoofdstuk begint met een korte inleiding, waarin onder andere de specificaties van de krachtsensor besproken zijn. Vervolgens wordt een overzicht van de verschillende meetprincipes voor krachten gegeven. Waar mogelijk worden bestaande voorbeelden van miniatuurkrachtsensoren aangehaald. Nadat de verschillende meetprincipes met elkaar vergeleken zijn, worden twee meetprincipes verder uitgewerkt: een piëzo-krachtsensor en een optische krachtsensor.*

### 4.1 Inleiding

Het gekozen concept voor een schrijvende computerpen gebruikt een drie-assige miniatuurkrachtsensor om tijdens het schrijven de contactkrachten tussen penpunt en papier te meten. Deze contactkrachten worden gebruikt om de snelheid en dus de beweging van de penpunt te bepalen. In hoofdstuk 2 zijn de specificaties voor deze krachtsensor opgesteld. Tabel 4.1 geeft een beknopt overzicht.

Tabel 4.1: De specificaties van de krachtsensor.

bereik	$\pm 2\text{N}$
nauwkeurigheid	1% of 0.02N
frequentiegebied	0...20Hz
stijfheid	$> 20\text{N/mm}$
afmetingen	
- buitendiameter	12mm
- binnendiameter	4mm
- lengte vulling	65mm
robuustheid	eindstoppen
operationeel bereik temperatuur	$20^\circ \pm 20^\circ\text{C}$
kostprijs	10€

Niettegenstaande deze specificaties speciaal voor een schrijvende computerpen opgesteld zijn, is het ontwerp van deze miniatuurkrachtsensor in een ruimer kader te situeren. Verschillende andere toepassingen hebben immers ook nood aan meer-assige miniatuurkrachtsensoren.

Een van deze toepassingen is endoscopische robotchirurgie [70, 71, 72, 73]. Bij endoscopische operaties worden medische instrumenten zoals een camera of een schaar via een kleine incisie in het lichaam ingebracht. Bij conventionele endoscopie worden deze instrumenten rechtstreeks door een chirurg bediend. Een nieuwe evolutie is echter de robotchirurgie, waarbij conventionele handbediende instrumenten vervangen worden door robotgestuurde instrumenten die de chirurg via een joystick bedient. Hierdoor kunnen operaties met een grotere precisie uitgevoerd worden. Het invoeren van deze robotgestuurde instrumenten gaat echter gepaard met het verlies van tactiele informatie tussen het instrument en de patient. Om deze tactiele terugkoppeling te herstellen, moet de kracht op het medisch instrument door een miniatuurkrachtsensor gemeten worden. Boone en Corteville [74] hebben voor deze toepassing een miniatuurkrachtsensor ontwikkeld.

Een ander toepassingsgebied van miniatuurkrachtsensoren is de assemblage van micro-onderdelen [75, 76]. Bij het manipuleren van deze micro-onderdelen is het immers belangrijk dat de grijp- en contactkrachten nauwkeurig gecontroleerd worden om schade te voorkomen.

## 4.2 Meetprincipes voor het meten van een kracht

Krachten kunnen op verschillende manieren gemeten worden. Deze paragraaf bespreekt kort de verschillende basisprincipes, waarbij telkens de voor- en nadelen aangehaald worden. Tevens komt het bestaande onderzoek aangaande meer-assige miniatuurkrachtsensoren aan bod. Dit overzicht leidt tot de keuze van het meest geschikte principe voor goedkope, meer-assige miniatuurkrachtsensoren.

### 4.2.1 Kracht meten via spanning

Een veel gebruikt principe voor het meten van krachten is gebaseerd op piëzo-materialen. Deze materialen zijn gevoelig voor mechanische spanningen en genereren een lading evenredig met de kracht die op het materiaal aangelegd wordt [77, 78, 79, 80]. Dit wordt uitgedrukt als:

$$q = d.F, \quad (4.1)$$

met  $q$  de lading gegenereerd door het piëzo-materiaal,  $d$  de veralgemeende ladingsgevoeligheid en  $F$  de veralgemeende aangelegde kracht. De ladingsgevoeligheid  $d$  verschilt naargelang het piëzo-materiaal een druk- of een schuifspanning ondervindt. Bij een drukspanning wordt  $d_{33}$  gebruikt en bij een schuifspanning  $d_{31}$ . Formule (4.1) is een sterk vereenvoudigde voorstelling van het piëzo-elektrisch effect. Voor een meer algemene benadering - waarbij  $d$  en  $F$  respectievelijk bestaan uit een matrix en een vector - wordt verwezen naar gespecialiseerde literatuur [79, 81].



Tabel 4.2 geeft een overzicht van enkele veel voorkomende piëzo-materialen. Naast het traditionele kwarts, bestaan er ook andere piëzo-materialen zoals Lood-Zirconaat-Titanaat (PZT) en Lood-Magnesium-Niobaat (PMN). Deze materialen zijn goedkoper en hebben een veel hogere ladingsgevoeligheid. Daartegenover staat dat deze materialen hysteresis en niet-lineair gedrag vertonen. Bovendien is hun temperatuursgevoeligheid hoger.

Tabel 4.2: Materiaaleigenschappen van piëzo-materialen [30, 82].

Materiaal	$T_{curie}$ (°C)	$d_{33}$ ( $10^{-12}C/N$ )	$d_{31}$ ( $10^{-12}C/N$ )	E (GPa)
Kwarts	550	2	-2	80
PZT	100-300	500	-250	50
PMN	170	730	-312	42

Piëzo-materialen zijn zeer geschikt voor het maken van miniatuurkrachtsensoren. De gegenereerde lading is immers onafhankelijk van de oppervlakte van de dwarsdoorsnede [30], daar de vermindering van de hoeveelheid gevoelig materiaal gecompenseerd wordt door de hogere spanningen in het materiaal. Daarom zijn verscheidene commerciële miniatuurkrachtsensoren (o.a. van Kistler, PCB, Dytan Instruments Inc. en Kiag Swiss) gebaseerd op piëzo-materialen.

Een voorbeeld is de drie-assige piëzo-krachtcel 9017A van Kistler [83], getoond in figuur 4.1. Hij is gebaseerd op drie kwarts-schijven, die tussen twee metalen platen van de behuizing gemonteerd zijn. Twee kwarts-schijven zijn gevoelig voor schuifspanningen en meten de krachten in het vlak van de sensor. De derde kwarts-schijf is gevoelig voor normaalspanningen en meet de axiale kracht. De afmetingen van de behuizing zonder de connector bedragen  $\phi 16.5\text{mm} \times 8\text{mm}$ . Binnen zijn meetbereik van  $\pm 1\text{kN}$ , heeft deze sensor een lineariteit van 1% en een kruisgevoeligheid tot 3.5%. Hij kost 3014€.



Figuur 4.1: 9017A van Kistler ( $\phi 16.5\text{mm} \times 8\text{mm}$ ) [83].

Piëzo-krachtsensoren kenmerken zich door een groot meetbereik (typisch enkele kN), een hoge stijfheid en een groot frequentiebereik. Ze hebben echter ook hun beperkingen. De bijhorende ladingsversterker, die de lading omzet naar een spanning, vormt een hoogdoorlaatfilter met als breekfrequentie  $f = \frac{1}{2\pi R_i C_i}$  [77]. Hierin is  $R_i$  de

lekweerstand en  $C_l$  de capaciteit van de ladingsversterker. Door deze hoogdoorlaatfilter kunnen piëzo-krachtsensoren geen statische krachten meten, al zijn quasi-statische metingen mogelijk.

#### 4.2.2 Kracht meten via rek

Een kracht kan onrechtstreeks bepaald worden via de rek in een structuur. Bij het ontwerp van deze structuur is het belangrijk dat de vervormingen steeds elastisch blijven om een lineaire omzetting van kracht naar rek te garanderen. Tevens mag de thermische uitzetting van de structuur niet verwaarloosd worden. Het meten van de rek in de structuur gebeurt door middel van resistieve of optische rekstrookjes.

##### Resistieve rekstrookjes

Resistieve rekstrookjes zijn metalen- of halfgeleider-elementen waarvan de weerstand verandert onder invloed van een lengteverandering [77, 84, 85]. Deze verandering van de weerstand is deels verklaarbaar door de veranderde geometrie van het rekstrookje en deels verklaarbaar door een intrinsieke verandering van het materiaal. Deze intrinsieke verandering wordt het piëzo-resistief effect genoemd. Bij metalen rekstrookjes overheerst het eerste effect, terwijl bij halfgeleiderrekstrookjes het piëzo-resistief effect het belangrijkste is. In beide gevallen is de relatieve verandering van weerstand in grote mate lineair met de rek. Voor rekstrookjes geldt daarom:

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon, \quad (4.2)$$

met  $\Delta R$  de verandering van de weerstand,  $R$  de weerstand van het onbelaste rekstrookje,  $K$  de rekstrookjesfactor en  $\varepsilon$  de rek.

Tabel 4.3: Vergelijking tussen metalen rekstrookjes en halfgeleiderrekstrookjes [30].

	Metalen (Constantaan)	halfgeleider (p-type Si)
factor $K$	+2.05	+140 ... +155
weerstand $R$	120 tot 350	350, 500, 1000
temperatuurscoëfficiënt van $K$	0.01%/°C	-0.26 ... -0.32 %/°C
temperatuurscoëfficiënt van $R$		0.25 ... 0.4
maximum rek $\varepsilon_{max}$	50000	1000 (5000)

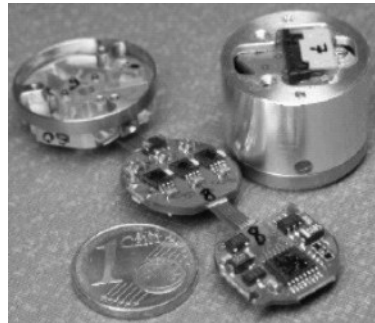
Tabel 4.3 vergelijkt metalen rekstrookjes met de halfgeleiderrekstrookjes. De gevoeligheid van halfgeleiderrekstrookjes ligt vijftig tot honderd keer hoger dan die van metalen rekstrookjes. Bovendien is de weerstand van een onbelast halfgeleiderrekstrookje hoger dan de weerstand bij een metalen rekstrookje. Hierdoor is het vermogenverbruik van dit rekstrookje lager. Daartegenover staat een hogere temperatuursgevoeligheid, de aanwezigheid van hysteresis en een minder lineair gedrag. Bovendien is de maximale rek lager dan bij de metalen rekstrookjes.

Krachtsensoren met rekstrookjes zijn onder te verdelen in twee groepen, namelijk krachtsensoren met gekleefde rekstrookjes en krachtsensoren met geïmplanteerde rekstrookjes. In het eerste geval worden rekstrookjes op een drager aangebracht, die vervolgens op een structuur gekleefd wordt. Deze structuur is geoptimaliseerd om op de plaats van de rekstrookjes een grote rek te geven. Sensoren met gekleefde rekstrookjes hebben een hoge kostprijs omdat het kleven en bedraden van de rekstrookjes een dure en tijdrovende bewerking is.

Een voorbeeld is de zes-assige krachtsensor NANO17 van ATI Industrial Automation [86], getoond in figuur 4.2(a). Hij heeft een buitendiameter van 17mm en een lengte van 14.5mm. Zijn meetbereik bedraagt 12N voor de krachten en 0.12Nm voor de momenten. Zijn richtprijs is 6000€. Figuur 4.2(b) toont een andere zes-assige krachtsensor, die door het Duitse luchtvaartcentrum (DLR) ontwikkeld is [87]. Hij heeft een meetbereik van 30N voor de krachten en 0.05Nm tot 0.15Nm voor de momenten. De diameter van de sensor bedraagt 20mm, met een hoogte van 16mm. Een derde voorbeeld is de drie-assige miniatuurkrachtsensor, die vroeger aan de K.U.Leuven ontworpen is. Deze sensor, getoond in figuur 4.2(c), heeft een meetbereik van 2N en een nauwkeurigheid van 0.75%. Zijn afmetingen bedragen  $\phi 12\text{mm}$  x



(a) Nano 17 van ATI Industrial Automation ( $\phi$  17mm x 14.5mm) [86].



(b) Zes-assige krachtsensor van DLR [87].

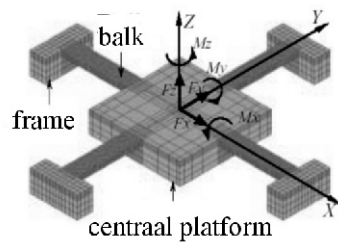


(c) Drie-assige krachtsensor van PMA.

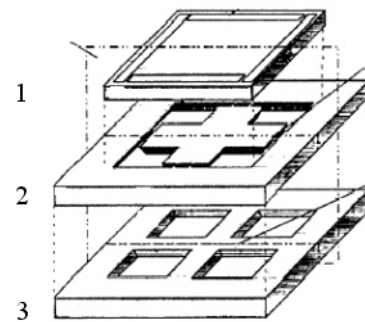
Figuur 4.2: Krachtsensoren gebaseerd op gekleefde rekstrookjes.

20mm. Meer details over deze sensor zijn te vinden in Appendix A.

De tweede groep krachtsensoren gebruikt geïmplanteerde rekstrookjes, die in een siliciumsubstraat aangebracht zijn. Vaak vormt het substraat tevens de elastische structuur van de krachtsensor, zoals de zes-assige krachtsensor ontwikkeld door Viet Dao [88]. Figuur 4.3(a) toont deze sensor. Hij bestaat uit een silicium kruis, dat in een vierkant kader opgehangen is. Op de armen van het kruis zijn 18 geïmplanteerde rekstrookjes aangebracht. De sensor heeft een meetbereik van 50mN en een maximale kruisgevoeligheid van 4%. Zijn afmetingen bedragen 3mm x 3mm x 0.4mm. Er bestaan ook krachtsensoren waarbij de flexibele structuur en het substraat met de geïmplanteerde rekstrookjes twee aparte onderdelen zijn. Hierdoor kunnen beide onderdelen voor hun deeltaak geoptimaliseerd worden. Een voorbeeld is de zes-assige krachtsensor van Jin [89], getoond in figuur 4.3(b). De sensor bestaat uit drie lagen, die onderling aan elkaar gehecht zijn. De onderste laag vormt de elastische structuur. Daarboven komt een tweede laag, waarin de geïmplanteerde rekstrookjes aangebracht zijn. De bovenste laag vormt het laadvlak, waarop de krachten aangelegd worden. Het geheel meet 4.5mm x 4.5mm x 1.2mm. De sensor heeft een resolutie van 1mN voor de krachten en 2mNm voor de momenten.



(a) Geïntegreerde zes-assige krachtsensor van Viet Dao [88].



(b) Meerlaags zes-assige krachtsensor van Jin: (1) laadvlak, (2) substraat met rekstrookjes, (3) elastische structuur [89].

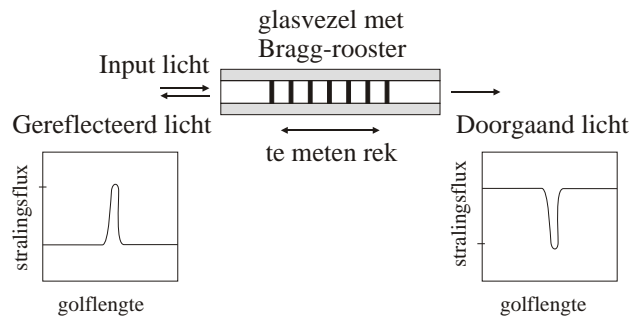
Figuur 4.3: Krachtsensoren gebaseerd op geïmplanteerde rekstrookjes.

De technologie van geïmplanteerde rekstrookjes leent zich uitstekend voor massaproductie zodat de kostprijs van deze sensoren laag kan zijn. De bijkomende integratie van de rekstrookjes in de structuur zorgt bovendien voor een toenemende miniaturisatie. Daartegenover staat de hoge temperatuursgevoeligheid van deze sensoren waardoor hun nauwkeurigheid beperkt is. Okada [90] rapporteert een temperatuursgevoeligheid van 14% bij een temperatuursverhoging van 20°C. Een bijkomend probleem is het aanleggen van de kracht op deze silicium sensoren doorheen de verpakking.

### Optische rekstrookjes

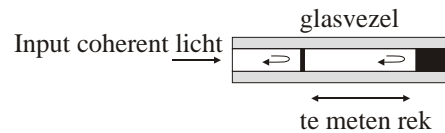
Een recente ontwikkeling zijn de optische rekstrookjes. Deze rekstrookjes zijn gebaseerd op een glasvezel met ofwel een ingebouwd Bragg-rooster ofwel een ingebouwde Fabry-Pérot interferometer.

Figuur 4.4 toont een glasvezel met een ingebouwd Bragg-rooster. Het Bragg-rooster reflecteert één specifieke golflengte, die afhangt van de afstand tussen de roosterlijnen. Wanneer de glasvezel gerekt wordt, verandert de afstand tussen de verschillende roosterlijnen en verschuift de golflengte van het weerkaatste licht. De verschuiving van de golflengte is dus een maat voor de rek in de glasvezel. Deze sensor heeft als voordeel dat er verschillende Bragg-roosters in één glasvezel geïntegreerd kunnen worden, zodanig dat een meer-assige krachtsensor met verschillende rekstrookjes slechts één glasvezel nodig heeft [91].



Figuur 4.4: Principe glasvezel met ingebouwd Bragg-rooster.

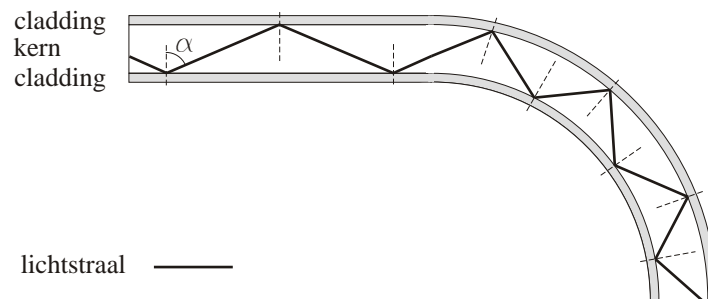
Figuur 4.5 toont een glasvezel met ingebouwde Fabry-Pérot interferometer. Deze glasvezel is voorzien van twee halfdoorlatende spiegels, die beide een deel van het coherente licht terugkaatsen. Afhankelijk van de afstand tussen deze spiegels, zullen de twee teruggekaatste lichtstralen elkaar versterken of verzwakken. Wanneer de glasvezel gerekt wordt, verandert de afstand tussen de vlakken waardoor de interferentie tussen beide weerkaatste lichtstralen verandert.



Figuur 4.5: Principe glasvezel met ingebouwd Fabry-Pérot interferometer.

De kostprijs van deze optische rekstrookjes is echter te hoog voor goedkope krachtsensoren. Bovendien zijn glasvezels minder geschikt voor miniatuurkrachtsensoren, omdat ze een maximale kromming hebben (typisch 100mm). Hierdoor kunnen enkel

rechte glasvezels gebruikt kunnen worden in miniatuursensoren. Om het licht af te buigen, moeten spiegels gebruikt worden, waardoor de complexiteit van het optische pad toeneemt. De oorzaak van de maximale kromming van glasvezels ligt bij de manier waarop het licht door een glasvezel getransporteerd wordt. Figuur 4.6 toont een doorsnede van een glasvezel. Hij bestaat uit een kern en een cladding, die beide een verschillende brekingsindex hebben. Bij een rechte glasvezel is de invalshoek  $\alpha$  van het licht groter dan de totale reflectiehoek, waardoor al het licht weerkaatst wordt en er geen transmissieverliezen optreden. Door het buigen van de glasvezel neemt deze invalshoek toe. Wanneer de kromming van de glasvezel te groot wordt, zal deze invalshoek kleiner worden dan de totale reflectiehoek. Hierdoor treedt er geen totale reflectie meer op en nemen de transmissieverliezen in de glasvezel sterk toe.



Figuur 4.6: Principe van de lichtvoortplanting doorheen een glasvezel.

### 4.2.3 Kracht meten via verplaatsing

Het derde alternatief om de krachten te meten, gebruikt een flexibele structuur om de krachten naar een verplaatsing te converteren. Deze verplaatsing wordt met een bijkomend meetsysteem gemeten.

De flexibele structuur is bijvoorbeeld een veer of een ingeklemde balk. Bij het ontwerp van deze structuur is het belangrijk dat de vervormingen steeds elastisch blijven om een lineaire omzetting van kracht naar verplaatsing te garanderen. Tevens mag de thermische uitzetting van de structuur niet verwaarloosd worden.

De vereisten voor het bijkomende verplaatsingsmeetsysteem zijn af te leiden uit de specificaties van de krachtensor. De vereiste stijfheid van 20N/mm komt overeen met een verplaatsing van 0.1mm onder een belasting van 2N. Aangezien de krachtensor een nauwkeurigheid van 1% moet hebben, is de minimale nauwkeurigheid van het verplaatsingsmeetsysteem gelijk aan  $1\mu\text{m}$ . Verschillende meetsystemen zijn in staat om deze kleine verplaatsing met de vereiste nauwkeurigheid te meten.

#### Magnetische meetprincipes

Verschillende meetprincipes voor verplaatsing zijn gebaseerd op het wijzigen van een kunstmatig magnetisch veld. Dit veld stoort echter de werking van het elektronisch

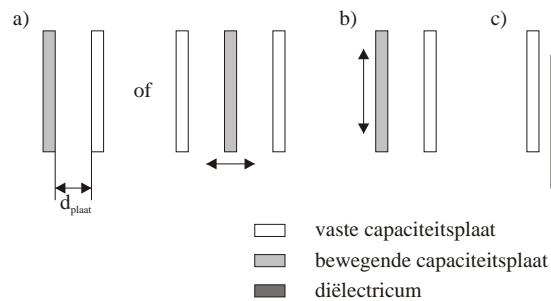
kompas in de pen, zodat deze meetprincipes in dit concrete geval niet bruikbaar zijn. Daarom wordt er niet dieper op de magnetische meetprincipes ingegaan.

### Capacitieve meetprincipes

Capacitieve meetprincipes zijn zeer gevoelig, waardoor ze zeer kleine verplaatsingen kunnen meten. De meest eenvoudige capaciteit is een vlakke platencondensator, waarvoor geldt:

$$C = \frac{\varepsilon_{medium} A}{d_{plaat}}, \quad (4.3)$$

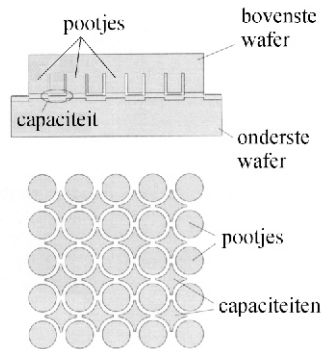
met  $C$  de capaciteit van de vlakke platencondensator,  $\varepsilon_{medium}$  de permittiviteit van het medium tussen de platen,  $A$  de oppervlakte van de platen en  $d_{plaat}$  de afstand tussen de platen. Uit formule (4.3) volgt dat als de afmetingen van de vlakke platen verkleinen, de afstand  $d_{plaat}$  tussen de platen kwadratisch moet afnemen om een gelijke capaciteit te bekomen. Vlakke platencondensatoren met een beperkt oppervlak vereisen dus een zeer kleine spleet (typisch 1 tot  $3\mu\text{m}$ ).



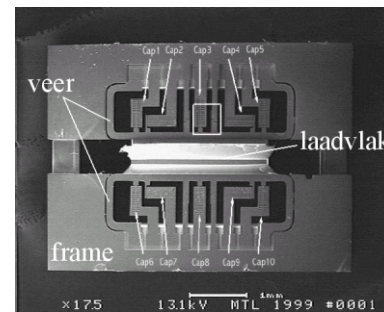
Figuur 4.7: Capacitieve verplaatsingsmetingen door het variëren van (a) de afstand  $d$ , (b) het oppervlak  $A$ , (c) het diëlectricum  $\varepsilon_{medium}$ .

Figuur 4.7 toont drie manieren om de capaciteit van een vlakke platencondensator te laten variëren [77]. Een eerste mogelijkheid (a) bestaat uit het variëren van de afstand  $d_{plaat}$  door één plaat beweegbaar op te stellen. Wiegierink [92] ontwierp een één-dimensionale krachtcel op basis van dit principe. Figuur 4.8(a) toont een doorsnede. Het bovenste substraat steunt via een matrix van pootjes op het onderste substraat. Onder een belasting verkorten deze pootjes en vermindert de afstand tussen beide substraten. Deze afstand wordt gemeten met behulp van een matrix van capaciteiten die zich tussen de pootjes bevindt. Deze matrix van pootjes en capaciteiten vermindert sterk de gevoeligheid voor niet-homogene belastingen. De totale afmetingen bedragen  $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ . Dit meetsysteem is echter niet lineair omdat  $d$  in de noemer voorkomt. Olthuis [93] gebruikte een niet-lineaire ophanging om de niet-lineariteit van de capacitieve sensor te compenseren. Een andere mogelijkheid maakt gebruik van drie platen, waarvan de middelste beweegt. Op die manier wordt de differentiële

capaciteitswijziging gemeten en deze wijziging is in grote mate wel lineair. Dit principe is toegepast in de zes-assige krachtsensor van Enikov [94]. Figuur 4.8(b) toont een bovenaanzicht van de sensor. In het midden zit het laadvlak, waarop de kracht aangelegd wordt. Dit laadvlak is opgehangen aan vier elastische veren. Aan de zijkant van het laadvlak zijn tien kam-vormige capaciteiten voorzien, die de beweging in het vlak meten. Een ander voorbeeld is de twee-assige krachtsensor van Sun [95].



(a) Krachtsensor van Wiegerink [92].



(b) Krachtsensor van Enikov [94].

Figuur 4.8: Krachtsensoren gebaseerd op capacatieve meting.

Een tweede manier om de capaciteit te wijzigen is een verandering van de oppervlakte  $A$ . Zie figuur 4.7b. Dit gebeurt door de vlakke platen ten opzichte van elkaar te laten verschuiven. De zes-assige krachtsensor van Enikov [94] gebruikt dit principe om de beweging in één richting te meten.

Figuur 4.7c toont de laatste mogelijkheid om de capaciteit te laten variëren, namelijk een variatie van het diëlectricum tussen beide platen. Dit principe is echter moeilijk miniaturiseerbaar omdat de afstand tussen beide platen zeer klein is.

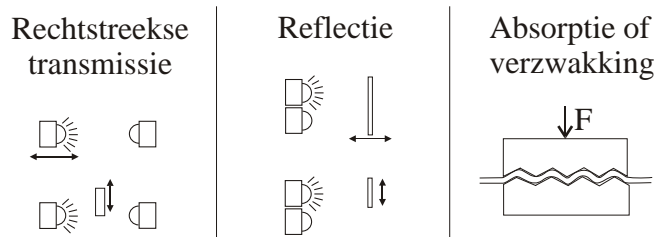
### Optische meetprincipes

Optische meetprincipes meten de verplaatsing op basis van licht. Centraal staan een bron en een detector, die respectievelijk het licht genereert en detecteert. Tussen de bron en detector wordt het licht in stralingsflux, fase of golflengte gemoduleerd.

Figuur 4.9 toont enkele voorbeelden om de stralingsflux van een lichtstraal te veranderen. Rechtstreekse transmissie is het meest eenvoudige geval: het licht van de bron valt rechtstreeks op de detector. De hoeveelheid licht varieert doordat de bron zich verplaatst of doordat een sluiters tussen bron en detector schuift. Dit principe wordt onder andere toegepast in optische encoders. Bij reflectieve transmissie weerkaatst het licht eerst op een spiegel alvorens het op de detector valt. De hoeveelheid licht varieert hier doordat de spiegel verplaatsbaar is opgesteld. Een derde manier om de stralingsflux te veranderen is op absorptie of verzwakking gebaseerd. Een voorbeeld is het micro-buigen, waarbij het licht geleid wordt door een glasvezel, waar met



een tandenstructuur op geduwd wordt. Deze tandenstructuur zorgt voor een sterke lokale kromming van de glasvezel. Hierdoor is de invalshoek van het licht op de cladding van de glasvezel kleiner dan de kritische hoek voor volledige terugkaatsing van het licht en gaat een deel van het licht verloren in de cladding van de glasvezel. Indien een grotere kracht op de tandenstructuur aangelegd wordt, vergroot de kromming en bijgevolg de verliezen in de glasvezel. De transmissieverliezen in de glasvezel zijn dus een maat voor de drukkracht op de tandenstructuur. Knowles [96] ontwikkelde een druksensor die op dit principe werkt.



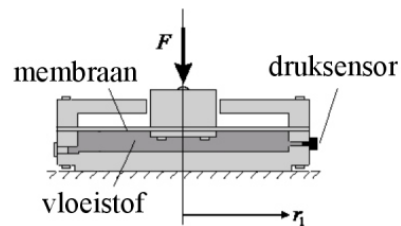
Figuur 4.9: Optische verplaatsingsmetingen gebaseerd op een verandering van de stralingsflux.

Bij fase-gemoduleerde sensoren wordt het licht van een coherente bron (laser) in twee gesplitst. Eén straal wordt gebruikt als referentie, terwijl de fase van de andere straal verandert door de te meten verplaatsing. Nadien worden beide stralen terug gecombineerd in de interferometer. Indien de fase van zowel de meetstraal als de referentiestraal samenvalt, dan versterken beide elkaar. Indien echter de fase tegengesteld is, dan doven beide stralen elkaar volledig uit. Het volledige meetbereik van de detector wordt dus gebruikt om het afstandsverschil van één golflengte te detecteren. Fase-gemoduleerde sensoren hebben bijgevolg een hoge resolutie, typisch subnanometer. Hun kostprijs ligt echter hoog, aangezien ze complexe componenten zoals een laserbron, een splitter en een interferometer nodig hebben. Enkel voor zeer grote aantallen is de kostprijs aanvaardbaar. Een voorbeeld hiervan is de lasereenheid van een CD speler. De aantallen bij de pentoepassing liggen echter lager zodat de kostprijs van deze systemen waarschijnlijk niet voldoende gedrukt kan worden. Bovendien kunnen deze meetsystemen moeilijk geminiaturiseerd worden door het groot aantal onderdelen.

De derde modulatietechniek verandert de golflengte van het uitgezonden licht. Een voorbeeld is de Fresnel-zoneplaat [77]. Er bestaan nog andere fysische principes die de frequentie veranderen, maar telkens is er nood aan een complex en duur meetsysteem voor het bepalen van de verschuiving van de golflengte. Frequentiemodulatie is dus geen geschikt alternatief voor een goedkope sensor.

#### 4.2.4 Kracht meten via druk

Een kracht uitgeoefend op een zuiger of een vervormbaar vloeistofreservoir laat de druk in het reservoir stijgen. Deze drukverandering wordt gemeten met een miniaturdruksensor en is dus een maat voor de aangelegde kracht. Het alternatief met de zuiger heeft een beperkte nauwkeurigheid door de wrijving tussen de zuiger en de cilinder. Bovendien treedt lek op in de zuiger. Deze minpunten gelden niet voor een gesloten vervormbaar vloeistofreservoir. Een voorbeeld is de één-assige vloeistofkrachtensor, ontwikkeld door Zwijze [97]. Deze sensor, getoond in figuur 4.10, heeft een membraan waarop in het midden een kracht aangelegd wordt. De straal  $r_1$  van dit membraan bedraagt 10cm. De repeeteerbaarheid en hysteresis van deze sensor zijn beperkt tot  $\pm 0.15\%$  en de lineariteit bedraagt  $\pm 1.0\%$ . Dit principe is echter moeilijk uit te breiden naar een meer-assige miniatuurkrachtensor.

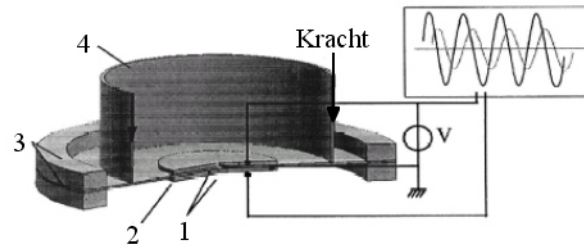


Figuur 4.10: Krachtensor gebaseerd op kracht-naar-druk omzetting [97].

#### 4.2.5 Kracht meten via resonantiefrequentie

De resonantiefrequentie van een balk of een membraan is afhankelijk van de kracht, waarmee de balk of het membraan aangespannen is. Bijgevolg kan een kracht gemeten worden via een verschuiving van de resonantiefrequentie. Gehin [98] ontwierp een krachtensor gebaseerd op een ingespannen membraan. Figuur 4.11 toont deze sensor. Het membraan, met een diameter van 40mm en een dikte van 0.1mm, is opgespannen tussen twee metalen ringen. In het midden zijn twee piëzo-schijven aangebracht. Eén schijf dient als actuator, terwijl de andere als sensor dient. De te meten kracht wordt aangelegd op de metalen cilinder die bovenop het membraan bevestigd is. De repeeteerbaarheid bedraagt 0.7%, de resolutie 0.098N, de gevoeligheid 6.6Hz/N en de thermische drift 9Hz/°C. De hoge thermische drift wordt voornamelijk veroorzaakt door het verschil in uitzettingscoëfficiënt van de verschillende onderdelen. Een ander voorbeeld, gebaseerd op de resonantiefrequentie van een balk, is te vinden in [99].

Krachtsensoren gebaseerd op het verschuiven van de resonantiefrequentie vereisen een actuator om de balk of het membraan in resonantie te brengen. Deze actuator is echter duur en moeilijk te miniaturiseren. Bovendien vereist deze actuator continu vermogen, waardoor de batterijen minder lang meegaan. Het grootste probleem vormt echter de uitbreiding naar een meer-assige krachtensor.



Figuur 4.11: Krachtsensor gebaseerd op kracht-naar-frequentie omzetting [98] (1)piëzo-schijf, (2)membraan, (3)ringen, (4)cilinder.

#### 4.2.6 Bespreking meetprincipes

Er bestaan verschillende principes voor het meten van een kracht. Het piëzo-elektrisch effect is een veel gebruikt principe voor het maken van krachtsensoren. Deze sensoren vormen echter een inherente hoogdoorlaatfilter. Om toch quasi-statisch te kunnen meten, is een grote capaciteit in de ladingsversterker vereist. Hiervoor moet de piëzo een hoge gevoeligheid hebben. Deze hoge gevoeligheid is realiseerbaar door verschillende lagen piëzo-materiaal boven elkaar aan te brengen. Het totale signaal van de sensor is dan de som van de individuele lagen. Ook het gebruik van PZT of PMN als piëzo-materialen geeft een grotere gevoeligheid. Dit principe is verder uitgewerkt in paragraaf 4.3.

Het tweede alternatief voor een krachtsensor meet de rek in een structuur met behulp van rekstrookjes. Deze rekstrookjes zijn onder te verdelen in metalen rekstrookjes, halfgeleiderrekstrookjes en optische rekstrookjes. De optische rekstrookjes zijn uit te sluiten omwille van hun hoge kostprijs. Ook het kleven van individuele rekstrookjes is een te dure bewerking. Geïmplanteerde rekstrookjes hebben dit nadeel niet. Daartegenover staat dat het gebruikte silicium broos is en de temperatuursgevoeligheid van de rekstrookjes hoog is. Een krachtsensor op basis van rekstrookjes wordt daarom niet verder beschouwd.

Het derde meetprincipe gebruikt een elastische structuur om de kracht naar een verplaatsing om te zetten. Deze verplaatsing wordt met een tweede meetsysteem opgemeten. Magnetische meetprincipes zijn hiervoor niet geschikt, daar deze principes het magnetisch kompas verstoren. Capacitief meten vormt wel een alternatief, aangezien dit principe een hoge resolutie en weinig onderdelen heeft. De kleine afstand tussen beide platen vereist echter hoge toleranties, waardoor de kostprijs van de sensor verhoogt. Daarom is dit meetprincipe niet verder uitgewerkt. De optische meetprincipes hebben ook een hoge resolutie. Fase- en golflengte-gemoduleerde meetsystemen zijn echter te duur en te groot. Intensiteit-gemoduleerde principes zijn wel geschikt. Daarom wordt een optische krachtsensor in paragraaf 4.4 ontwikkeld, waarbij de verplaatsing op basis van de stralingsflux gemeten wordt.

Het vierde meetprincipe converteert de kracht naar een druk. Omdat de miniaturisatiegraad van dit meetprincipe beperkt is en de uitbreiding naar een meer-assige krachtsensor niet voor de hand ligt, wordt dit meetprincipe verworpen.

Tot slot is het laatste meetprincipe gebaseerd op de verschuiving van de resonantiefrequentie van een snaar of een membraan. Dit principe vormt geen geldig alternatief, omdat het moeilijk naar een meer-assige krachtsensor uit te breiden is.

## 4.3 Piëzo-krachtsensor

Het eerste uitgewerkt alternatief voor de krachtsensor is op piëzo-materialen gebaseerd. Het ontwerp start met de keuze van het piëzo-element, dat de kern van de krachtsensor vormt. De mogelijkheden van het gekozen piëzo-element worden in een voorstudie onderzocht. Deze voorstudie vormt de basis voor het verdere ontwerp van de krachtsensor. Op basis van de analyse wordt een prototype ontworpen, gebouwd en getest.

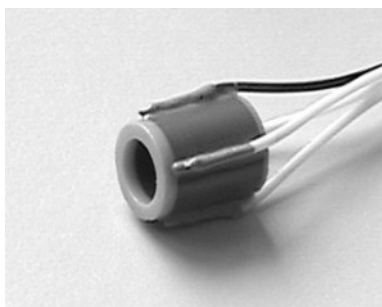
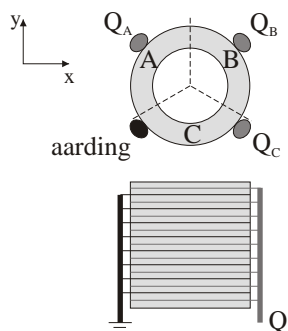
### 4.3.1 Het piëzo-element

Het piëzo-element vormt de basis van een piëzo-krachtsensor. Opdat dit element ook lage frequenties zou kunnen meten, moet het piëzo-element een hoge gevoeligheid hebben. Deze hoge gevoeligheid laat immers toe om een grote capaciteit in de ladingsversterker in te stellen en bijgevolg een grote tijdsconstante van de inherente hoogdoorlaatfilter te bekomen. Deze hoge gevoeligheid wordt bekomen door PZT of PMN te gebruiken in plaats van het klassieke kwarts. Bovendien wordt het piëzo-element uit verschillende lagen opgebouwd. Hierbij is de totaal gegenereerde lading de som van de gegenereerde ladingen van elke laag.

De drie-assige piëzo-krachtsensor heeft minstens drie piëzo-elementen nodig om alle krachten te meten. De integratie van deze drie piëzo-elementen in één monolithische structuur zorgt voor een reductie van de afmetingen en een vereenvoudiging van de assemblage. Een voorbeeld van een dergelijke geïntegreerde component is de piëzo-buis van Xinetics [82]. Figuur 4.12(a) toont deze component, die de vorm heeft van een buis met een buitendiameter van 7.5mm en een hoogte van 10mm. Voor de binnendiameter zijn er drie maten, namelijk 2.64mm, 3.63mm en 4.95mm. Voor grote aantallen ligt de kostprijs onder 10€.

Figuur 4.12(b) toont het principe van deze piëzo-buis. De piëzo-buis is met behulp van zeefdruk [100] in verschillende lagen opgebouwd. In totaal bestaat de piëzo-buis uit 86 actieve lagen PMN:PZ<sup>TM</sup> materiaal met een dikte van 0.1mm. De materiaaleigenschappen zijn opgesomd in tabel 4.4. De elektrodes, die tussen de verschillende lagen piëzo-materiaal zitten, zijn van bovenaf bekeken in drie delen opgesplitst. Hierdoor heeft de component drie gevoelige gebieden, op figuur 4.12(b) aangeduid als A, B en C. De 86 lagen zijn dus mechanisch in serie geplaatst en elektrisch in parallel geschakeld om een grote gevoeligheid te bekomen.

De piëzo-buis is als actuator ontworpen om een spiegel te roteren en te verplaatsen. Via het direct piëzo-elektrisch effect is hij theoretisch ook bruikbaar als drie-assige krachtsensor. Figuur 4.13 toont de verschillende belastingsgevallen. Een axiale kracht op de piëzo-buis geeft gelijke drukspanningen in de drie gevoelige gebieden (A,B,C) en is bijgevolg evenredig met de som van de signalen A, B en C. Een tangentiële kracht, die op een hefboom aangrijpt, veroorzaakt een moment op de piëzo-buis.

(a) Foto ( $\phi$  7.5mm x 10mm).

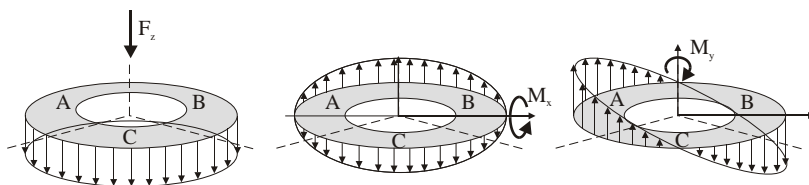
(b) Principe.

Figuur 4.12: De piëzo-buis van Xinetics.

Tabel 4.4: De materiaaleigenschappen van PMN:PZ™.

$d_{33}$	$730 \cdot 10^{-12} \text{C/N}$
soortelijke massa	$7.85 \text{kg/m}^3$
E-modulus (open)	82GPa
E-modulus (kortgesloten)	42GPa

Een moment in de x-richting veroorzaakt een drukkracht in gebied C en netto een trekspanning in de gebieden A en B. Het moment in de x-richting is dus evenredig met het signaal C vermindert met de helft van de signalen A en B. Een moment in de y-richting veroorzaakt een trekspanning in gebied A en een drukspanning in gebied B. Gebied C ondervindt evenveel trek- als drukspanningen en genereert bijgevolg geen signaal. Het moment in de y-richting is dus evenredig met het verschil van de signalen A en B. Theoretisch is de piëzo-buis dus in staat een axiale kracht en twee momenten te meten. Indien de hefboomsarm gekend is, kan hieruit de drie krachten berekend worden. Of de piëzo-buis van Xinetics in de praktijk als krachtsensor geschikt is, wordt in de voorstudie nagegaan.



Figuur 4.13: De verschillende belastingsgevallen voor de piëzo-buis.

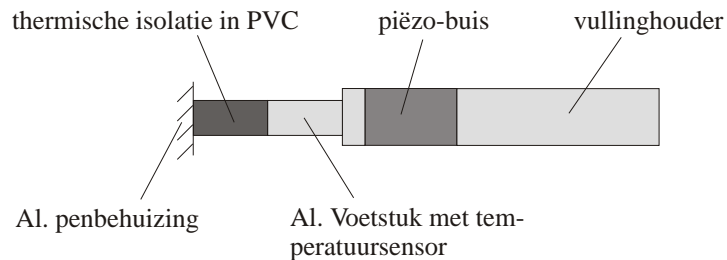
### 4.3.2 Voorstudie

De voorstudie onderzoekt de gevoeligheid, de resolutie en de temperatuursgevoeligheid van de piëzo-buis. Bij de proeven is telkens de piëzo-buis met de grootste binnendiameter (4.95mm) gebruikt. Deze voldoet immers als enige aan de vereiste minimale binnendiameter van de krachtsensor.

#### Testopstelling

Figuur 4.14 toont de testopstelling. De linkerzijde van de piëzo-buis is aan een aluminium voetstuk vastgelijmd. Het voetstuk heeft de vorm van een cilinder en is voorzien van een NTC-weerstand, die de temperatuur meet. Het voetstuk is op zijn beurt aan de aluminium penbehuizing vastgeschroefd. Bij sommige proeven wordt tussen het voetstuk en de penbehuizing een PVC tussenstuk geplaatst om de piëzo-buis thermisch te isoleren van de buitenwereld. De rechterzijde van de piëzo-buis is aan een aluminium cilinder vastgelijmd, die de vullinghouder symboliseert. Het geheel wordt door een gearde metalen behuizing (niet getoond op figuur 4.14) van de buitenwereld afgeschermd.

De signaaldraden van de piëzo-buis zijn aangesloten op drie ladingsversterkers van Kistler (type 5001), die de lading omzetten naar een spanning. Deze spanning wordt door een meetkaart (National Instruments AT-MIO-16XE-50) gemeten. De ladingsversterkers zijn ingesteld op een capaciteit van 10nF en een lekweerstand van  $10^{11}\Omega$ . Bijgevolg bedraagt de breekfrequentie van de hoogdoorlaatfilter  $16 \cdot 10^{-5}\text{Hz}$ , wat voor deze toepassing volstaat.



Figuur 4.14: De testopstelling met de piëzo-buis van Xinetics.

#### Gevoeligheid en resolutie

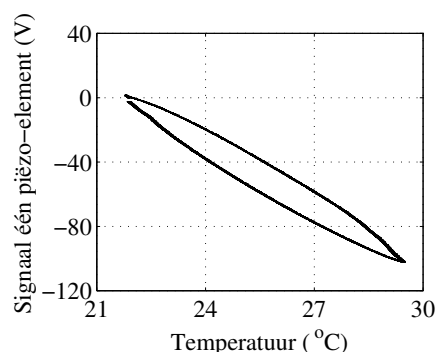
Om de gevoeligheid van de piëzo-buis te testen, wordt een moment rond de x-as aangelegd. Dit moment bedraagt 0.035Nm en geeft een kracht van 3N op het gebied C. Gebied C genereert hierdoor een lading van 300nC, wat overeenkomt met een gevoeligheid van 100nC/N per element. Ter vergelijking, een typische kwarts-krachtsensor (bijvoorbeeld 9251A van Kistler) heeft een gevoeligheid van 3.90pC/N.

De ruis op het signaal van één piëzo-element bedraagt 2mV. Rekening houdend met een ingestelde capaciteit van 10nF en een gevoeligheid 100nC/N, komt dit overeen met een resolutie van 0.5mN.

### Temperatuursgevoeligheid

Om de temperatuursgevoeligheid te meten, is de testopstelling door aanraking met de hand opgewarmd van 21.8°C tot 29.5°C om ze nadien aan de lucht te laten afkoelen tot 21.8°C. Bij deze proef is de drift op de signalen zo groot, dat de ladingsversterker voor het einde van de proef in verzadiging zou gaan. Om dit te beletten wordt de ladingsversterker automatisch terug op nul gesteld vlak voordat hij in verzadiging gaat. Nadien worden de meetdata tussen de verschillende resets terug achter elkaar geplaatst. Op die manier wordt een virtueel onverzadigbare ladingsversterker bekomen.

Figuur 4.15 toont het signaal van één piëzo-element in functie van de temperatuur. Tijdens het opwarmen wordt de bovenste helft van de curve doorlopen en bij het afkoelen de onderste helft. De maximale gecumuleerde drift bedraagt 102V voor een temperatuursverhoging van 8°C. De temperatuursgevoeligheid bedraagt dus 13V/°C. De invloed van de temperatuur over het volledige temperatuursbereik van 20°C is bijgevolg 650 keer groter dan de vereiste resolutie. De oorzaak van deze grote drift ligt bij de thermische spanningen, die onder invloed van de temperatuur in het materiaal optreden. Deze thermische spanningen genereren immers ook een lading in het piëzo-materiaal.



Figuur 4.15: De temperatuursgevoeligheid van de piëzo-buis.

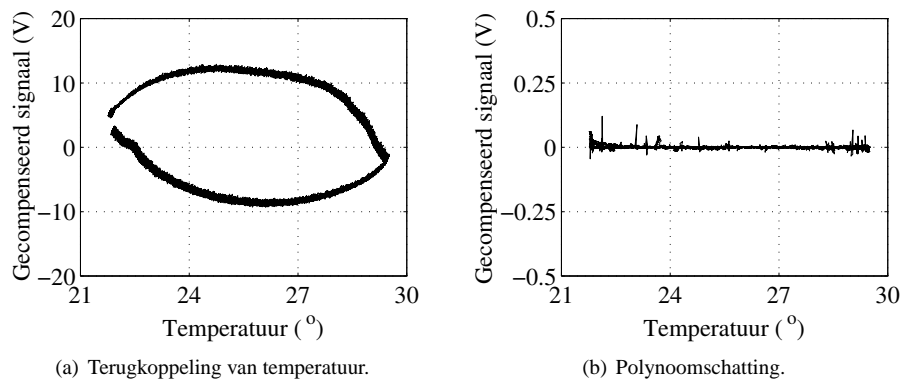
Naast de thermische spanningen in de piëzo-buis zelf, treden er ook thermische spanningen op in het contactoppervlak waar de piëzo-buis tegen de aluminium cilinders gekleefd is. Beide materialen hebben immers een verschillende uitzettingscoëfficiënt, namelijk  $7 \cdot 10^{-6}/\text{K}$  voor het piëzo-materiaal en  $23.2 \cdot 10^{-6}/\text{K}$  voor aluminium. Deze lokale thermische spanningen in het contactoppervlak zorgen echter niet voor het genereren van ladingen, aangezien de piëzo-buis aan beide uiteinden enkele niet-gevoelige lagen heeft. Deze stelling wordt bevestigd met een tweede testopstelling. Hierbij is de piëzo-buis aan een titanium cilinder vastgelijmd. Titanium heeft

een uitzettingscoëfficiënt van  $8.7 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ , zodat de thermische spanningen in het contactoppervlak sterk gereduceerd worden. De opwarmingsproeven met deze nieuwe testopstelling tonen echter geen verbetering: de drift blijft even groot. De thermische spanningen in het contactoppervlak leveren dus een verwaarloosbare bijdrage in de drift.

### Verminderen van de temperatuursgevoeligheid

De meest voor de hand liggende manier om de invloed van de temperatuur te verminderen, is het thermisch isoleren van de piëzo-buis t.o.v. de behuizing. In de testopstelling wordt een PVC tussenstuk tussen de aluminium voetsteun en de aluminium penbehuizing gemonteerd. Het tussenstuk heeft een buitendiameter van 6mm en een lengte van 10mm. Het heeft een thermische weerstand van 2200K/W. Deze thermische weerstand vermindert de drift van 1.1V/s naar 0.3V/s. Daar de temperatuursgevoeligheid met een factor 650 onderdrukt moet worden, volstaat deze thermische weerstand niet. De overblijvende temperatuursinvloed moet verder gecompenseerd worden.

Twee manieren om de temperatuur te compenseren zijn uitgewerkt. De eerste compensatietechniek meet de temperatuur met een extra sensor en koppelt deze terug. Het resultaat van deze terugkoppeling is echter beperkt doordat het temperatuur-effect hysteresis vertoont: de opwarmings- en afkoelingscurve zijn immers verschillend. Figuur 4.16(a) toont het resultaat na de compensatie. De maximale fout is van 102V naar 20V teruggebracht. De reductie bedraagt slechts een factor 5.



Figuur 4.16: Compensatie van de temperatuur.

De tweede compensatietechniek maakt gebruik van het feit dat tussen het schrijven van de opeenvolgende woorden de pen van het papier opgetild wordt. De krachtensor is dan onbelast. Bij verwaarlozing van de inertiekrachten op de inktvulling en het eigen gewicht van de inktvulling, bevat het signaal enkel drift. Door een polynoom door al deze metingen van de drift te trekken, wordt de evolutie van de drift geschat. Deze schatting wordt gebruikt om de drift tijdens het schrijven van een woord te compenseren. Concreet wordt de drift voor elk woord apart geschat, rekening houdend met data



van de onbelaste krachtsensor voor en na het woord . Voor deze schatting wordt een 2<sup>e</sup> orde polynoom gebruikt. Aangezien de testopstelling geen schrijfproeven toelaat, worden de periodes in de lucht met de bestaande data gesimuleerd. Stel dat het schrijven van een woord 5 seconden duurt en de periode tussen woorden 0.5 seconden. Dit komt overeen met het schrijven van woorden met 10 letters. Figuur 4.16(b) toont het resultaat na compensatie. De temperatuursinvloed is volledig gecompenseerd.

### Besluit

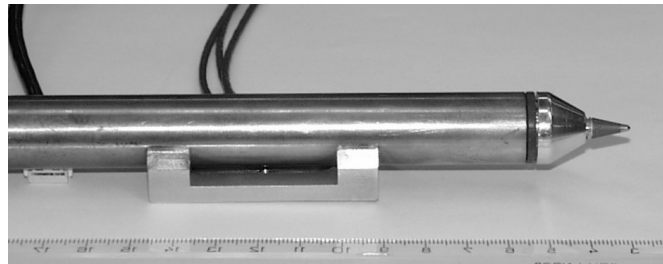
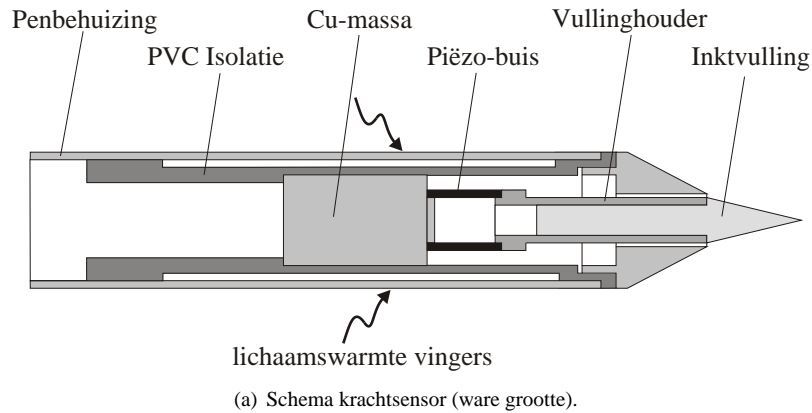
De piëzo-buis van Xinetics heeft een gevoeligheid van 100nC/N. Hierdoor is de breekfrequentie van de ladingsversterker voldoende laag om frequenties tot  $16 \cdot 10^{-5}$  Hz te meten. De sensor vertoont echter een grote temperatuursgevoeligheid. Het thermisch isoleren vermindert deze temperatuursgevoeligheid, maar bijkomende compensatietechnieken zijn nodig. Twee technieken zijn uitgewerkt. De eerste compensatietechniek, die de temperatuur meet en terugkoppelt, reduceert de temperatuursgevoeligheid slechts gedeeltelijk. De beperkte compensatie is verklaarbaar door de hysteresis op het temperatuurseffect. De tweede compensatietechniek, die gebaseerd is op de polynoomschatting van de drift, levert wel goede resultaten op.

### 4.3.3 Ontwerp

Het vooronderzoek toont aan dat de piëzo-buis van Xinetics enkel bruikbaar is wanneer de temperatuursvariaties beperkt blijven. Het ontwerp van de krachtsensor maximaliseert daarom de thermische tijdsconstante, zodat de temperatuur van de sensor slechts weinig fluctueert. De hoge thermische tijdsconstante wordt gerealiseerd door een massa te voorzien, die geïsoleerd van de behuizing opgesteld staat.

Figuur 4.17(a) toont het ontwerp. De buitendiameter bedraagt 16mm. Centraal staat de koperen massa ( $\phi 12$ mm x 20mm), die een thermische capaciteit van 7.5J/K heeft. Deze massa is van de behuizing geïsoleerd door middel van een PVC isolatie, waarvan de thermische weerstand 1200K/W bedraagt. Hierdoor heeft de koperen massa een thermische tijdsconstante van 2.5uur. Bijgevolg ondervindt de temperatuur van de koperen massa weinig invloed van de temperatuursvariaties aan de buitenkant van de behuizing. De piëzo-buis van Xinetics is tegen deze koperen massa gelijmd. Voor een nauwkeurige positionering van de piëzo-buis is deze massa voorzien van een kraag. In de koperen massa zijn gleuven (niet getoond) voorzien, die de kabels van de piëzo-buis naar achteren geleiden. Aan het andere uiteinde van de piëzo-buis is de vullinghouder met de inktvulling gelijmd. De inktvulling is een verkorte BIC®. Figuur 4.17(b) toont de uiteindelijke krachtsensor, gemonteerd in de pen.

De elektronische schakelingen uit de voorstudie blijven behouden: de gegenereerde ladingen worden door externe ladingsversterkers omgezet naar een spanning en opgemeten door een meetkaart. De gevoeligheid van de ladingsversterker wordt wel met een factor vijf verlaagd door de grootst mogelijke capaciteit (50nF) in te stellen. Hierdoor gaat de ladingsversterker minder snel in verzadiging en verlaagt de breekfrequentie van de hoogdoorlaatfilter tot  $32 \cdot 10^{-6}$  Hz, dit wil zeggen een equivalente tijdsconstante van 1.38uur.



Figuur 4.17: Krachtsensor gebaseerd op piëzo-buis.

#### 4.3.4 Testen

De krachtsensor wordt onderworpen aan een aantal proeven om de gevoeligheid en temperatuursgevoeligheid na te gaan.

##### Gevoeligheid

Het verband tussen de signalen  $V = [V_A V_B V_C]^T$  van de piëzo-buis en de krachten  $F^{pen} = [F_x F_y F_z]^T$  op de penpunt is algemeen te schrijven als  $F^{pen} = AV$ . De elementen van de  $3 \times 3$  kalibratiematrix  $A$  worden uit het inverse verband berekend, namelijk  $V = A^{-1}F^{pen}$ . De matrix  $A^{-1}$  is te bepalen door telkens een gekende kracht volgens één van de hoofdasen aan te leggen. De verhouding van de signalen tot de aangelegde kracht vormen de gezochte elementen van de matrix  $A^{-1}$ .

Voor het aanleggen van de kracht, wordt de krachtsensor met de penpunt naar boven in een houder bevestigd. Een kracht in de verticale richting wordt aangelegd door een gewicht bovenop de penpunt te plaatsen. De krachten in een horizontaal vlak worden aangelegd door middel van een touw, een katrol en een gewicht. De katrol is voorzien van een speciaal kunststoflager met glazen kogels om de wrijving te minimaliseren. De fout, die de wrijving in dit lager veroorzaakt, is maximaal 0.01N. De

kracht van 0.98N wordt 10 keer aangelegd, waarna een gemiddelde genomen wordt. Dit geeft uiteindelijk:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.955 & -5.676 & -0.375 \\ 5.718 & 1.1170 & -0.229 \\ -3.705 & 3.818 & -0.186 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix}_{pen}. \quad (4.4)$$

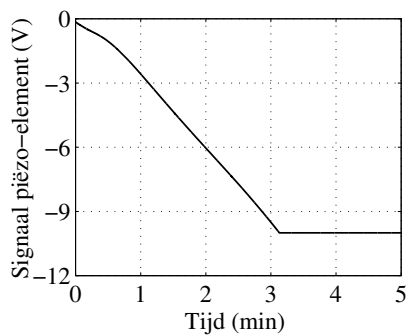
Hieruit volgt het rechtstreekse verband:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix}_{pen} = \begin{bmatrix} -0.0299 & 0.1133 & -0.0792 \\ -0.0871 & 0.0467 & 0.1181 \\ -1.1922 & -1.2982 & -1.3745 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix}. \quad (4.5)$$

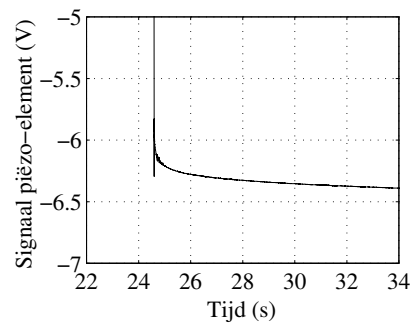
De verbanden voor de x- en y-kracht wijken af van de eenvoudige formules  $V_A - V_B$  en  $V_C - V_A/2 - V_B/2$  die in paragraaf 4.3.1 opgesteld zijn. Deze afwijking wordt veroorzaakt doordat de piëzo-buis niet uitgelijnd is ten opzichte van het gebruikte penassenstelsel. Deze uitlijning is echter onmogelijk omdat de piëzo-buis niet voorzien is van een merkteken dat de richting van de interne assen aangeeft.

### Temperatuursgevoeligheid

Om de temperatuursgevoeligheid te testen, wordt de krachtsensor vastgemaakt in een houder. Gedurende 3.5 minuten wordt hij door aanraking met de hand opgewarmd. Figuur 4.18 toont het signaal van één piëzo-element in functie van de tijd. Ondanks de grote thermische inertie is de ladingsversterker na 3.2 minuten reeds in verzadiging. Het verzadigen van de ladingsversterker kan echter vermeden worden door de ladingsversterkers automatisch op nul te stellen vlak voordat verzadiging optreedt. Deze nulstelling moet nadien software-matig gecompenseerd worden. De nauwkeurigheid van deze automatische nulstelling is echter beperkt, aangezien de ladingsversterker tijdens de nulstelling gedurende 30ms geen lading meet. De fouten bij opeenvolgende nulstellingen zijn bovendien additief.



Figuur 4.18: Temperatuursgevoeligheid piëzo-krachtsensor.



Figuur 4.19: Kruip bij de piëzo-krachtsensor.

Na het software-matig compenseren van de nulstelling, wordt de drift gecompenseerd met behulp van een polynoomschatting door de onbelaste delen van het signaal. Hierbij wordt het eigen gewicht van de inktvulling (0.05N) en de inertiekrachten op de inktvulling (0.02N) verwaarloosd. De nauwkeurigheid van de driftschatting wordt verder beperkt doordat het signaal bij het plots aanleggen of wegvallen van een kracht slechts langzaam zijn eindwaarde bereikt. Figuur 4.19 toont het signaal versus de tijd bij het aanleggen van een kracht. Het signaal neemt niet onmiddellijk zijn eindwaarde aan, maar gaat er langzaam naar toe. Het verschil tussen de beginwaarde vlak na het aanleggen van de belasting en de eindwaarde bedraagt 6% ( $\sim 0.06N$ ). Wanneer de kracht wegvalt tussen twee woorden in, zal dit fenomeen ook optreden. Samengevat beperken deze drie fouten de nauwkeurigheid van de polynoomschatting tot 0.13N.

### 4.3.5 Bespreking

Het eerste uitgewerkte alternatief voor een drie-assige miniatuurkrachtsensor is gebaseerd op de piëzo-buis van Xinetics. De piëzo-buis bestaat uit drie piëzo-elementen die in één buisvormige structuur geïntegreerd zijn. Hiermee is de piëzo-buis in staat om één kracht en twee momenten te meten. Rekening houdend met de gekende afstand tussen de sensor en de penpunt is deze piëzo-buis ook geschikt voor het meten van de kracht op de penpunt in drie richtingen. Door zijn hoge gevoeligheid (100nC/N) kunnen frequenties vanaf  $32 \cdot 10^{-6}\text{Hz}$  (=3db punt) gemeten worden. Zijn kostprijs is lager dan 10€. De piëzo-buis heeft echter een zeer hoge temperatuursgevoeligheid. Bovendien zit er hysteresis op deze temperatuursgevoeligheid, zodanig dat het terugkoppelen van de temperatuur slechts beperkte verbetering geeft.

Om de temperatuursinvloed te beperken, heeft de ontworpen krachtsensor een grote ingebouwde thermische inertie. Deze thermische inertie bestaat uit een koperen massa die geïsoleerd opgesteld staat. Ondanks deze grote thermische inertie, vertoont de krachtsensor een sterke drift van zodra de pen vastgenomen wordt. Zonder de automatisch nulstelling van de ladingsversterkers, gaat de sensor na 3.2 minuten in verzadiging. De drift is compenseerbaar door middel van een polynoomschatting door de onbelaste periodes tussen het schrijven van woorden. Niettegenstaande deze schatting de drift grotendeels compenseert, blijft de nauwkeurigheid van de sensor beperkt tot 0.13N. De oorzaak ligt deels bij het kruip-effect, waardoor de sensor na het wegvallen van de kracht pas langzaam naar een stabiele waarde evolueert, en deels bij de inertie- en zwaartekracht, die op de inktvulling werken.

Samengevat: de piëzo-buis van Xinetics is enkel geschikt voor het maken van goedkope drie-assige krachtsensoren als de toepassing geen temperatuursvariaties oplegt. Aangezien een computerpen wel temperatuursvariaties ondervindt, is deze sensor niet bruikbaar voor deze toepassing.

## 4.4 Optische krachtsensor

Het tweede alternatief voor de krachtsensor is de optische krachtsensor beschreven in paragraaf 4.2. Hij bestaat uit een combinatie van een elastisch element, dat de kracht omzet naar een verplaatsing, en een optisch meetsysteem, dat deze verplaatsing meet.

Dit alternatief wordt in deze paragraaf uitgewerkt tot een drie-assige krachtsensor.

#### 4.4.1 Optische componenten voor miniatuursensoren

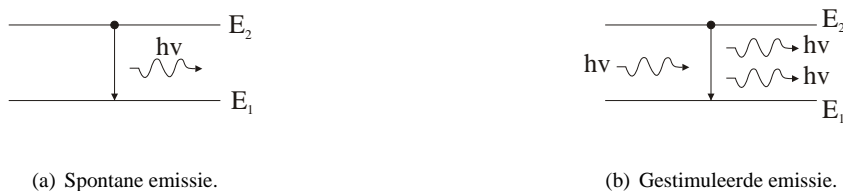
Elk optisch verplaatsingsmeetsysteem gebruikt ten minste twee basiselementen, namelijk een lichtbron en een lichtdetector. Daarnaast bestaan er verschillende bijkomende optische componenten zoals lenzen, spiegels en glasvezels.

##### Lichtbronnen

Er bestaat een grote verscheidenheid aan lichtbronnen, in verschillende afmetingen, vormen en vermogens. Een uitgebreid overzicht is te vinden in [101]. Hierin wordt een onderscheid gemaakt tussen thermische bronnen en luminescentiebronnen.

Thermische bronnen zijn gebaseerd op de thermische straling, die een voorwerp op hoge temperatuur afstraalt. Meestal bestaat dit voorwerp uit een wolframdraad, omgeven door een glazen behuizing met een vacuüm- of speciale gasatmosfeer. Voorbeelden zijn een standaard gloeilamp en een halogeenlamp, die een typische werkingstemperatuur van respectievelijk 2500K en 3000K hebben. Deze bronnen kenmerken zich door een breed lichtspectrum. Voor sensortoepassingen hebben ze hierdoor een lagere efficiëntie, omdat de detectoren slechts gevoelig zijn voor een beperkt deel van dat spectrum. De afmetingen van deze thermische bronnen variëren van enkele millimeters tot meer dan tien centimeter. Kleinere afmetingen zijn niet mogelijk omdat de wolframdraad steeds omkapseld is om een vacuüm- of speciale gasatmosfeer te creëren. Deze beperkte miniaturisatie in combinatie met de hoge werkingstemperaturen en de lage efficiëntie maakt thermische bronnen ongeschikt voor miniatuursensoren.

De tweede groep van bronnen zijn de luminescentiebronnen. Deze bronnen zetten energie rechtstreeks om naar licht, zonder de tussenliggende stap van thermische energie. De hoge temperaturen, die vereist zijn bij thermische bronnen, komen hier dus niet voor. Bovendien stralen deze bronnen een beperkt lichtspectrum uit dat door een detector grotendeels terug omgezet kan worden naar elektrische energie. Hierdoor hebben luminescentiebronnen een hoge efficiëntie. Het werkingsprincipe van deze bronnen is gebaseerd op spontane of gestimuleerde emissie.



Figuur 4.20: Principes bij luminescentiebronnen.

Figuur 4.20(a) toont het principe van spontane emissie. Door de sprong van een

elektron van een hoog energieniveau  $E_2$  naar een laag energieniveau  $E_1$  ontstaat er een foton met energie  $E_2 - E_1$ . Aangezien de sprongen willekeurig optreden, verschillen de opgewekte fotonen in fase. Spontane emissie geeft bijgevolg niet-coherent licht. De compactste vertegenwoordiger van deze bronnen zijn Light-Emitting Diodes (LEDs). Het zijn goedkope halfgeleidercomponenten met een p-n junctie, waarvan de stralingssterkte evenredig is met de stroom door de LED. Het lichtspectrum hangt af van de gebruikte materialen en varieert van verschillende kleuren in het zichtbare gebied tot straling in het nabije en midden-infrarode gebied. Hierbij hebben de infrarood LEDs een stralingssterkte die tot 50 keer hoger ligt dan de LEDs in het zichtbare gebied. De grootte van een naakte halfgeleidercomponent varieert van 0.025mm tot enkele millimeters. Een voorbeeld is de OD-880-C infrarood LED van Opto Diode Corporation, met als afmetingen 0.35mm x 0.35mm x 0.20mm. Om de naakte halfgeleidercomponent te beschermen, wordt hij in een behuizing geplaatst. Deze behuizing kan voorzien zijn van een ingebouwde lens om de openingshoek van de lichtstraal te verkleinen. Enkele typische voorbeelden van LEDs zijn gegeven in tabel 4.5. De kleinste behuizing is de 0402 verpakking (1.0mm x 0.5mm x 0.5mm).

Figuur 4.20(b) toont het tweede principe voor luminescentiebronnen, namelijk gestimuleerde emissie. Onder invloed van een invallend foton springt een elektron van een hoog energieniveau  $E_2$  naar een laag energieniveau  $E_1$ . Hierdoor ontstaat een tweede foton met dezelfde fase in tijd en ruimte. Dit effect wordt versterkt door gebruik te maken van een resonantiekamer, bestaande uit twee spiegels waartussen het licht over en weer kaatst. Bij elke doorgang van het licht worden bijkomende fotonen door gestimuleerde emissie gecreëerd. Een deel van het licht verlaat de resonantiekamer via een kleine opening in één spiegel en geeft een smalle coherente lichtstraal. Dit principe wordt toegepast in lasers. Voor miniatuursensoren zijn enkel de halfgeleider-diodelasers belangrijk. Aangezien het werkingsprincipe van deze lichtbronnen complexer is dan die van LEDs, ligt hun kostprijs hoger. Een voorbeeld is de SMV2637-001 laser, gefabriceerd door Honeywell. Deze heeft een afmeting van 3.81mm x 2.54mm x 2.10mm en kost 4.1 €.

### Lichtdetectoren

De voornaamste detectoren voor het meten van de stralingsflux zijn thermische detectoren en fotondetectoren. De eersten zijn gebaseerd op de thermische opwarming van de detector door het invallend licht [77]. Om deze opwarming te meten, is de detector uitgerust met een temperatuursensor. Aangezien alle golflengtes van het licht evenveel bijdragen tot de opwarming, zijn deze sensoren gevoelig voor een breed lichtspectrum. Hun frequentiebereik is door de thermische inertie van de sensor beperkt. De sensoren worden voornamelijk gebruikt voor het op afstand meten van de temperatuur. Ze zijn niet geschikt voor meer-assige miniatuursensoren omdat de verschillende detectoren in de sensor elkaar beïnvloeden. De detectoren zitten immers dicht tegen elkaar, zodanig dat bij het opwarmen van één detector de andere detector ook beïnvloed wordt.

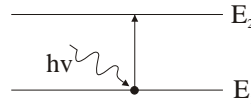
Het tweede principe is gebaseerd op de absorptie van de fotonen [77, 102, 103, 104]. Figuur 4.21 toont dit proces. Een elektron van een laag energieniveau  $E_1$  in de valentieband springt naar een hoog energieniveau  $E_2$  in de geleidingsband door het

Tabel 4.5: Typische voorbeelden van LEDs.

type	fabrikant	golflengte (nm)	openingshoek (graden)	afmetingen (mm)	stralingssterkte	prijs/stuk (+1000)
KPHS-1005QBC-D	Kingbright	465 (blauw)	120	1.0 x 0.5 x 0.5	0.088mW/sr @20mA	0.482€
KPHS-1005MGCK	Kingbright	565 (groen)	120	1.0 x 0.5 x 0.5	0.066mW/sr @20mA	0.128€
KPHS-1005SYCK	Kingbright	590 (geel)	120	1.0 x 0.5 x 0.5	0.088mW/sr @20mA	0.085€
KPHS-1005SURCK	Kingbright	640 (rood)	120	1.0 x 0.5 x 0.5	0.205mW/sr @20mA	0.085€
QTLP630C-2	Fairchild	805 (IR)	140	1.25 x 2 x 1.25	0.022mW/sr @20mA	0.098€
KP-1608SF4C	Kingbright	880 (IR)	120	1.6 x 0.8 x 1.1	1mW/sr @20mA	
SME2470	Honeywell	880 (IR)	12	3.81 x 2.54 x 2.1	3.5mW/sr @50mA	
SME6700	Honeywell	880 (IR)	120	2.8 x 3.2 x 1.5	4.1mW/sr @50mA	
HSDL-4400-1L1	Agilent Techn.	875 (IR)	110	2 x 2 x 2.4	6mW/sr @50mA	0.37€
HSDL-4420-1L1	Agilent Techn.	875 (IR)	24	2 x 2 x 2.9	17mW/sr @50mA	0.37€
CQY37N	Vishay	950 (IR)	12	3.3 x 2.4 x 3.3	5mW/sr @50mA	

Tabel 4.6: Typische voorbeelden van fofondetectoren.

type	fabrikant	golflengte (nm)	categorie	afmetingen (mm)	gevoeligheid $\mu\text{A} @ 1\text{mW}/\text{cm}^2$	prijs/stuk (+1000)
HSDL-5400	Agilent Techn.	875 (IR)	diode	2.3 x 2.2 x 2.4	1.6	0.37€
HSDL-5420	Agilent Techn.	875 (IR)	diode	2.3 x 2.2 x 2.9	6	0.37€
SMD2420	Honeywell	880 (IR)	diode SMD	3.8 x 2.5 x 2.1	6	
BPW17N	Temic	825 (IR)	transistor	3.3 x 2.4 x 3.4	1000	
PT91-21BH7	Everlight	980 (IR)	transistor	2.5 x 2.5 x 2.7	1500	
KP-1608P1BT	Kingbright	940 (IR)	transistor	1.6 x 0.8 x 1.1	300	0.11€
SMD2440	Honeywell	880 (IR)	transistor SMD	3.1 x 2.5 x 2.1	3000	3.46€
SD 055-23-21-011	Adv. Photonix	940 (IR)	4 kwadrant	$\phi$ 5.4 x 5.3		23.5€
QD7-5	Centronic	820 (IR)	4 kwadrant	$\phi$ 9.4 x 6.6	500	37€
SSO-EL-3.5X-SMD	Silicon Sensors	850 (IR)	1D PSD SMD	4.5 x 3 x 2.2	620	
S7848	Hamamatsu	960 (IR)	2D PSD	7.0 x 5.0 x 1.8	580	6.97€



Figuur 4.21: Absorptieprincipe bij fotonensensoren.

invallen van een foton. Enkel invallende fotonen met een hoeveelheid energie gelijk aan de energiesprong  $E_2 - E_1$  worden geabsorbeerd. Aangezien de hoeveelheid energie van een foton samenhangt met zijn frequentie, zijn fotodetectoren enkel gevoelig voor een smal lichtspectrum. Voor sensoren is dit een interessante eigenschap omdat omgevingsstraling buiten dit spectrum niet gemeten wordt. De belangrijkste vertegenwoordigers van fotodetectoren zijn de fotodiode en de fototransistor. Tabel 4.6 geeft een overzicht van enkele typische fotodiodes en fototransistoren.

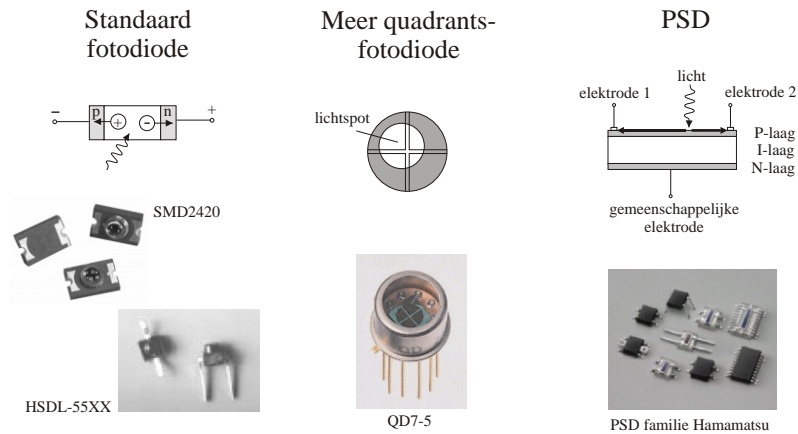
Een fotodiode is een halfgeleidercomponent met een p-n overgang. Schematisch is een fotodiode voor te stellen als een combinatie van een stroombron met een diode en bijgevolg geldt voor de stroom  $I_{fotodiode}$  door de fotodiode:

$$I_{fotodiode} = I_{foto} + I_{dk} \left( e^{\frac{qV_0}{kT}} - 1 \right), \quad (4.6)$$

met  $I_{foto}$  de stroom gegenereerd door het invallend licht,  $I_{dk}$  de lekstroom,  $q_e$  de lading van een elektron,  $V_0$  de spanning over de fotodiode,  $k$  de constante van Boltzmann en  $T$  de temperatuur in Kelvin. De stroom  $I_{foto}$  is over zes tot negen decades evenredig met de stralingsflux [104]. Figuur 4.22 toont de verschillende vormen waarin fotodiodes voorkomen. De meest eenvoudige vorm is de standaard fotodiode met één gevoelig oppervlak. Deze standaard fotodiodes worden meestal voorzien van een behuizing uit kunststof. Zoals bij LEDs, kan een lens in de behuizing geïntegreerd worden om de gevoeligheid te verhogen. Meer complexe vormen van fotodiodes zijn de twee- en vier-kwadrantsfotodiode, waarbij er respectievelijk twee of vier fotogevoelige oppervlakken langs elkaar liggen. Deze componenten meten de positie van een lichtspot op basis van de relatieve signaalverhouding tussen de verschillende kwadranten. Hierbij meet de twee-kwadrantsfotodiode de positie van de lichtspot in één richting, terwijl de vier-kwadrantsfotodiode de positie in twee richtingen meet. De relatieve meting is onafhankelijk van de stralingssterkte van de lichtbron, waardoor het meetsysteem robuuster is. De stralingssterkte van de LED wordt immers beïnvloed door temperatuur- en voedingsspanningsfluctuaties. Daartegenover staat dat een PSD groter en duurder is dan een standaard fotodiode. De laatste vorm, waarin fotodiodes voorkomen, is het Position Sensitive Device (PSD), die ook de positie van een lichtspot meet. Wanneer de lichtspot het fotogevoelige oppervlak van de PSD raakt, genereert dit oppervlak op die plaats een lading evenredig met de stralingsflux. Deze lading vloeit via een resistieve laag naar twee elektrodes. De verdeling van de lading over beide elektrodes is omgekeerd evenredig met de afstand van de lichtspot tot de elektrodes. Zoals uit tabel 4.6 blijkt, zijn deze componenten echter duurder en



omvangrijker dan standaard fotodiodes.



Figuur 4.22: Verschillende vormen van fotodiodes (afmetingen zie tabel 4.6).

Naast fotodiodes bestaan er ook fototransistoren, die schematisch voor te stellen zijn als een combinatie van een fotodiode met een ingebouwde transistor. Deze transistor versterkt de stroom van de fotodiode met een factor 100 tot 1000. Dit gaat echter ten koste van de lineariteit. Bovendien verhoogt de temperatuursgevoeligheid tot typisch 1%/K, wat een factor tien hoger is dan bij fotodiodes. Fototransistoren worden gebruikt in weinig eisende toepassingen, zoals lichtonderbrekers en isolatoren.

### Overige optische componenten

Naast de bron en detector bestaat er een grote verscheidenheid aan optische componenten om het licht te geleiden of te moduleren. Een uitgebreid overzicht wordt gegeven door Buczek [105]. De meest gebruikte componenten zijn lenzen, spiegels en glasvezels.

**Lenzen** Lenzen bestaan uit twee brekende oppervlakken, waarvan er minstens één gebogen is. Een lichtstraal die op de lens valt, convergeert of divergeert naargelang de vorm van de lensoppervlakken. Lenzen zijn makkelijk miniaturiseerbaar. Standaard worden lenzen met een diameter vanaf 1.5mm aangeboden [103]. In de literatuur zijn diameters tot  $2\mu\text{m}$  vermeld [106]. Lenzen kunnen bovendien geïntegreerd worden in de behuizing van een lichtbron of een lichtdetector.

**Spiegels** Spiegels bestaan uit een reflectief oppervlak dat het licht weerkaatst. Dit oppervlak kan zowel vlak als gebogen zijn. Vaak heeft een nauwkeurig afgewerkt metalen oppervlak een voldoende hoge reflectiviteit. Kunststoffen onderdelen kunnen spiegelend gemaakt worden door er een metaal op te dampen. Om de reflectiviteit

van het spiegelen oppervlak constant te houden in de tijd, is een beschermende laag vereist om het oxideren van het spiegelen metaaloppervlak tegen te gaan.

**Glasvezels** Glasvezels geleiden het licht van de bron via de sensor naar detector. Vaak is de werking van de sensor zelf gebaseerd op de specifieke eigenschappen van de glasvezel [65, 107, 108]. De maximale kromming van glasvezels is echter groter dan de diameter van een computerpen, waardoor de glasvezels enkel in de langsricting van een pen gebruikt kunnen worden. Bovendien is de automatische assemblage van deze flexibele onderdelen niet eenvoudig. Glasvezels zijn dus minder geschikt voor sensoren in een computerpen.

### Besluit

De basiscomponenten van elk optisch meetsysteem zijn de lichtbron en de lichtdetector. Rekening houdend met de beperkingen op prijs en grootte, vormen infrarood LEDs het beste alternatief voor de lichtbron. Halfgeleider-diodelasers zijn immers duurder en de overige lichtbronnen zijn te groot. Binnen de groep van LEDs genieten infrarood LEDs de voorkeur, aangezien deze een grotere stralingssterkte hebben.

Voor de lichtdetectoren vormen de fotodiodes het beste alternatief, daar de fototransistoren een te hoge temperatuursgevoeligheid hebben en de thermische detectoren niet geschikt zijn. De kleinste en goedkoopste vorm is de standaard fotodiode met één gevoelig oppervlak. Twee- of vierkwadrantsfotodiodes en PSDs zijn te duur en te groot.

De overige optische componenten, zoals lenzen en spiegels zijn in kleine dimensies verkrijgbaar. Toch moeten ze zoveel mogelijk vermeden worden, omdat ze de prijs van het optische meetsysteem enkel doen toenemen. Glasvezels zijn niet toepasbaar vanwege hun maximale kromming.

## 4.4.2 Voorstudie: Eén-assig optisch verplaatsingsmeetsysteem

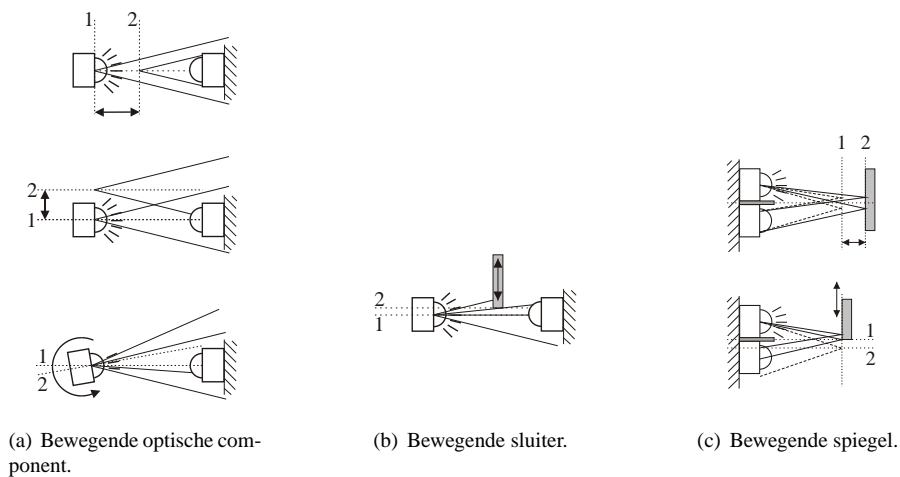
### Specificaties

De specificaties van het optische meetsysteem volgen uit de specificaties van de krachtensor. De flexibele structuur moet een minimale stijfheid van 20N/mm hebben. Aangezien het volledige meetbereik van de krachtensor  $\pm 2\text{N}$  bedraagt, zal deze structuur  $\pm 0.1\text{mm}$  vervormen. Het meetbereik van het optische verplaatsingsmeetsysteem bedraagt dus 0.1mm. Deze verplaatsing moet met een nauwkeurigheid van  $1\mu\text{m}$  gemeten worden opdat de krachtensor een nauwkeurigheid van 1% of 0.02N zou hebben. Het vereiste frequentiebereik bedraagt minimaal [0. . .20Hz] en het meetsysteem moet een operationeel temperatuursbereik van  $20^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$  hebben. Verder moet het meetsysteem in de krachtensor geïntegreerd kunnen worden. Een richtprijs voor één optisch meetsysteem bedraagt 1€. De drie-assige krachtensor (met een richtprijs van 10€) bestaat immers uit drie optische meetsystemen en een flexibele structuur.

### Keuze optische verplaatsingsmeetprincipe

Optische verplaatsingsmeetprincipes zijn gebaseerd op de modulatie van het licht tussen bron en detector. Zoals paragraaf 4.2.3 reeds vermeldt, zijn de meetprincipes gebaseerd op fase- of frequentiemodulatie te omvangrijk of te duur en wordt hier enkel de modulatie van de stralingsflux verder uitgediept.

De optische meetprincipes op basis van de modulering van de stralingsflux zijn op te splitsen in absolute en relatieve meetprincipes. Bij de absolute meetprincipes hangt de stralingsflux door de detector af van de te meten verplaatsing. Fluctuaties in de stralingssterkte van de lichtbron geven echter ook fluctuaties in de stralingsflux door de detector, zodanig dat ze niet te onderscheiden zijn van de te meten verplaatsing. Relatieve meetprincipes vertonen dit nadeel niet. Deze relatieve meetprincipes wijzigen niet de totale stralingsflux, maar wel de positie van de lichtspot op de detector. Deze positie wordt differentieel gemeten door middel van een twee- of vierkwadrantsfotodiode of een PSD. Deze detectoren zijn echter te duur en te groot voor goedkope miniatuursensoren. Daarom worden enkel de absolute meetprincipes verder beschouwd.



Figuur 4.23: Optische meetsystemen op basis van absolute metingen.

Binnen de groep van absolute meetprincipes, bestaan er verschillende mogelijkheden om de stralingsflux te wijzigen. Figuur 4.23(a) toont het meest eenvoudige principe. Het bevat enkel de bron en de detector. Eén van beide is bewegend opgesteld, waardoor de stralingsflux door de detector varieert in functie van de verplaatsing. Het nadeel van dit principe is de bekabeling van de bewegende component. Figuur 4.23(b) toont een beter alternatief, waarbij de bron en detector vast gemonteerd zijn. Daartussen beweegt een sluitert, die een deel van het licht van de bron afschermt en zo de stralingsflux wijzigt. Een derde alternatief, getoond in figuur 4.23(c), maakt gebruik van een spiegel om het licht van een diffuse bron naar de detector te kaatsen. Indien de spiegel loodrecht op het spiegelend oppervlak beweegt, dan wijzigt de hoeveelheid

invallend licht. Een variant van dit principe gebruikt de rand van een spiegel om meer of minder licht terug te kaatsen. Omdat dit reflectieve alternatief een complexere optische component (de spiegel) gebruikt dan het rechtstreekse alternatief (de sluiters), is geopteerd voor het alternatief met de bewegende sluiters.

### Ontwerp één-assig verplaatsingsmeetsysteem

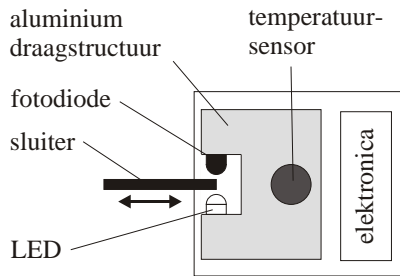
Het ontwerp van het optische verplaatsingsmeetsysteem start met de keuze van de LED en de fotodiode. Aangezien deze componenten bedoeld zijn voor de optische krachtensor, zijn kostprijs en afmetingen de belangrijkste criteria. Tevens moet het vermogenverbruik beperkt zijn opdat een batterij als voeding gebruikt kan worden. Hierdoor moet het rendement van het meetsysteem hoog zijn. Dit wordt bereikt door een LED te kiezen met een hoge stralingssterkte en een fotodiode met een hoge gevoeligheid. De infrarood LED HSDL-4420-1L1 en de fotodiode HSDL-5420-1L1 zijn compacte, goedkope optische componenten, die in de optische telecommunicatie gebruikt worden. Door hun geïntegreerde lens hebben ze respectievelijk een hoge stralingssterkte en een hoge gevoeligheid. Tabel 4.7 somt hun voornaamste eigenschappen op.

Tabel 4.7: De specificaties van de LED en fotodiode.

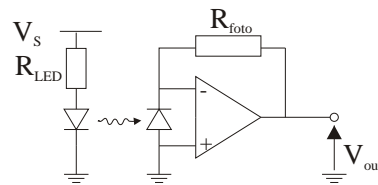
	LED HSDL-4420-1L1	fotodiode HSDL-5420-1L1
producent	Agilent Technologies	Agilent Technologies
type	TS AlGaAs	PIN fotodiode
golflengte	875nm	875 nm
afmetingen	2mm x 2mm x 3mm	2mm x 2mm x 3mm
openingshoek	24°	28°
intensiteit	17mW/sr bij 50mA	–
gevoeligheid	–	6 $\mu$ A bij $E_e=1\text{mW/cm}^2$ en $V_R=5\text{V}$
kostprijs	0.37 €/stuk (+1000)	0.37 €/stuk (+1000)

Figuur 4.24 toont het één-assige verplaatsingsmeetsysteem. De LED wordt op een aluminium draagstructuur gekleefd, recht tegenover de fotodiode. De afstand tussen beide componenten bedraagt 1.5mm. Verder is de draagstructuur voorzien van een temperatuursensor (type LM35). De sluiters heeft een dikte van 0.66mm. Het geheel is gemonteerd op een standaard printplaat waarop de signaalverwerking staat.

De signaalverwerking zet de stroom van de fotodiode om in een spanning, die door een meetkaart (National Instrument AT-MIO-16XE-50) gemeten wordt. Verschillende mogelijkheden voor deze omzetting zijn in de literatuur beschreven [103]. Een actieve stroom-spanningsomzetter, getoond in figuur 4.25, geeft de beste resultaten. De fotodiode is met de ingangen van de operationele versterker verbonden, waardoor de fotodiode virtueel kortgesloten wordt. Doordat er geen spanning over de fotodiode



Figuur 4.24: Het één-assige verplaatsingsmeetsysteem.

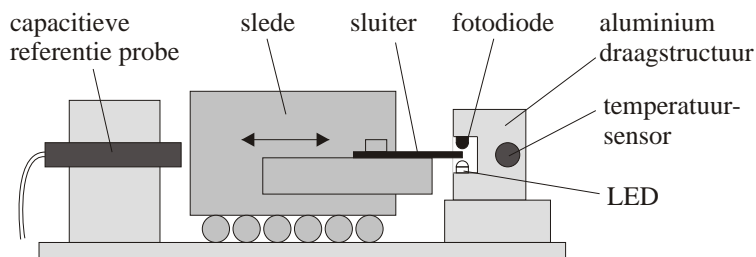


Figuur 4.25: De actieve stroomspanningsomzetting.

staat ( $V_0=0$ ), valt de niet-lineaire term uit vergelijking (4.6) weg en wordt de gevraagde  $I_{foto}$  rechtstreeks gemeten. Bovendien is de temperatuur niet langer meer een parameter in formule (4.6), zodat de temperatuursgevoeligheid van de fotodiode nul is.

#### Testen één-assig verplaatsingsmeetsysteem

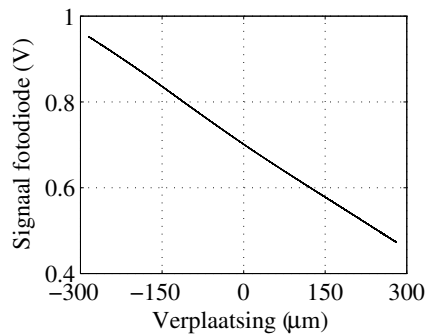
Figuur 4.26 toont schematisch de testopstelling. Het één-assige verplaatsingsmeetsysteem wordt vast met de omgeving verbonden. De sluiter, die tussen de LED en de fotodiode beweegt, is gemonteerd op een nauwkeurige lineaire slede. De positie van deze slede wordt opgemeten met een capacitieve meetprobe PX405H8M in combinatie met de versterker DMT12. Beide zijn gemaakt door Lion Precision. Dit referentie meetsysteem heeft een resolutie van 20nm en een nauwkeurigheid van 0.2%.



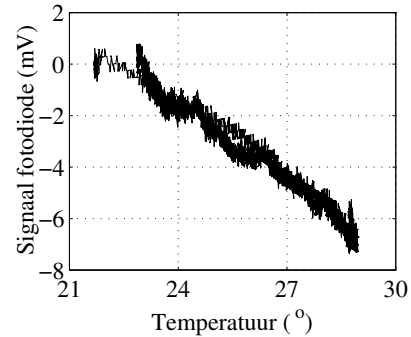
Figuur 4.26: Het één-assige verplaatsingsmeetsysteem.

De eerste test bestaat uit het opmeten van de ruis. De uitgangsspanning wordt gemeten, terwijl de positie van de slede en de temperatuur constant gehouden worden. De effectieve waarde van deze spanning bedraagt 0.68mV. Vermindering van deze ruis is mogelijk door de sensor in een gearde metalen behuizing te monteren en door de signalen te filteren.

Vervolgens worden het bereik, de lineariteit en de resolutie bepaald. In een nieuwe proef wordt de temperatuur constant gehouden en de slede verplaatst. Figuur 4.27(a) geeft het signaal van het optische verplaatsingsmeetsysteem in functie van de verplaatsing opgemeten met de referentie meetprobe. Het verband is lineair over een bereik van  $560\mu\text{m}$ . De afwijking ten opzichte van een rechte is kleiner dan 1%. De helling van de rechte bedraagt  $-25.5\text{mV}/\mu\text{m}$ . Rekening houdend met de weerstand over de operationele versterker geeft dit een gevoeligheid van  $-0.51\mu\text{A}/\mu\text{m}$ . Aangezien de effectieve waarde van de ruis  $0.68\text{mV}$  bedraagt, is de resolutie beperkt tot  $2 \times 0.68\text{mV} / (25.5\text{mV}/\mu\text{m}) = 53\text{nm}$ .



(a) Signaal één-assig verplaatsingsmeetsysteem.



(b) Temperatuursinvloed één-assig verplaatsingsmeetsysteem.

Figuur 4.27: Testen met het 1D verplaatsingsmeetsysteem.

Tot slot wordt de temperatuursgevoeligheid opgemeten. Hiervoor wordt de verplaatsing van de slede constant gehouden en de temperatuur van het optische meetstelsel gevarieerd. Eerst neemt de temperatuur toe van  $21.7^\circ\text{C}$  tot  $29^\circ\text{C}$ , waarna de sensor afkoelt tot kamertemperatuur. Figuur 4.27(b) toont het verloop van de uitgangsspanning in functie van de temperatuur. Omwille van de duidelijkheid is de offset op de uitgangsspanning verwijderd, zodanig dat de curve start bij  $0\text{V}$  op  $21.7^\circ\text{C}$ . De temperatuursgevoeligheid bedraagt  $0.92\text{mV}/^\circ\text{C}$ . Bij een maximale temperatuurverschil van  $20^\circ\text{C}$  bedraagt de offset bijgevolg  $18.4\text{mV}$  of  $0.7\%$  van het volledige bereik. Doordat er geen verschil tussen de opwarmingscurve en de afkoelingscurve bestaat, kan de temperatuursinvloed verder beperkt worden door een eenvoudige terugkoppeling van de temperatuur.

### Besluit

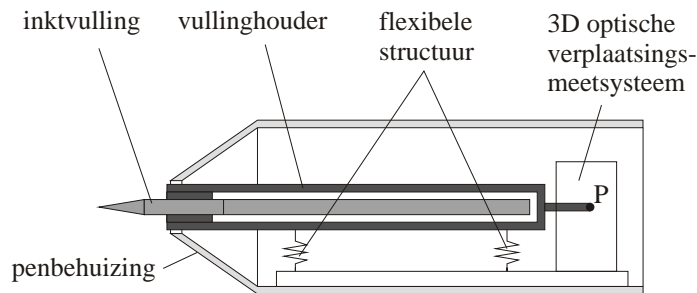
De voorstudie toont aan dat het gekozen meetprincipe voor deze toepassing een voldoende hoge resolutie ( $53\text{nm}$  i.p.v.  $1\mu\text{m}$ ) en een voldoende groot bereik ( $560\mu\text{m}$  i.p.v.  $100\mu\text{m}$ ) heeft. De niet-lineariteit ( $<1\%$ ) ligt op de grens van de vereiste nauwkeurigheid ( $1\%$ ). De temperatuursgevoeligheid ( $0.92\text{mV}/^\circ\text{C}$ ) is niet verwaarloosbaar, maar een eenvoudige terugkoppeling van de temperatuur is voldoende om het meetstelsel

te stabiliseren.

### 4.4.3 Ontwerp

#### Algemeen concept

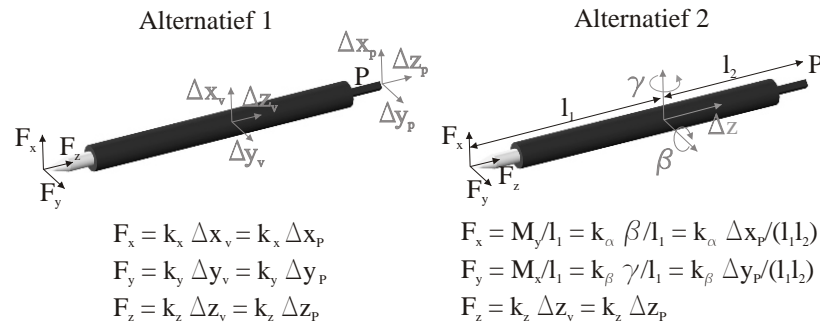
Figuur 4.28 toont het algemeen concept van de drie-assige, optische krachtsensor. De inktvulling is vlak achter de penpunt vastgemaakt aan de vullinghouder, die bestaat uit een roestvast stalen buis met een buitendiameter van 4.7mm, een binnendiameter van 2.9mm en een lengte van 62mm. De krachten, uitgeoefend op de penpunt, worden hierdoor onmiddellijk afgeleid naar de vullinghouder. De vervormingen van de vullinghouder onder deze krachten zijn verwaarloosbaar. De vullinghouder is vastgemaakt aan de flexibele structuur, die - omwille van plaatsbeperking - rond de vullinghouder geconstrueerd is. Deze flexibele structuur vervormt onder de te meten kracht. De resulterende verplaatsing van de vullinghouder wordt opgemeten door het drie-assige, optische verplaatsingsmeetsysteem, dat zich achter de vullinghouder bevindt. Dit meetsysteem meet de positie van het punt P aan het uiteinde van de vullinghouder. Hierbij is het belangrijk dat de flexibele structuur de drie componenten van de kracht ontkoppelt zodanig dat elke component overeenstemt met een verplaatsing van het punt P in één enkele richting.



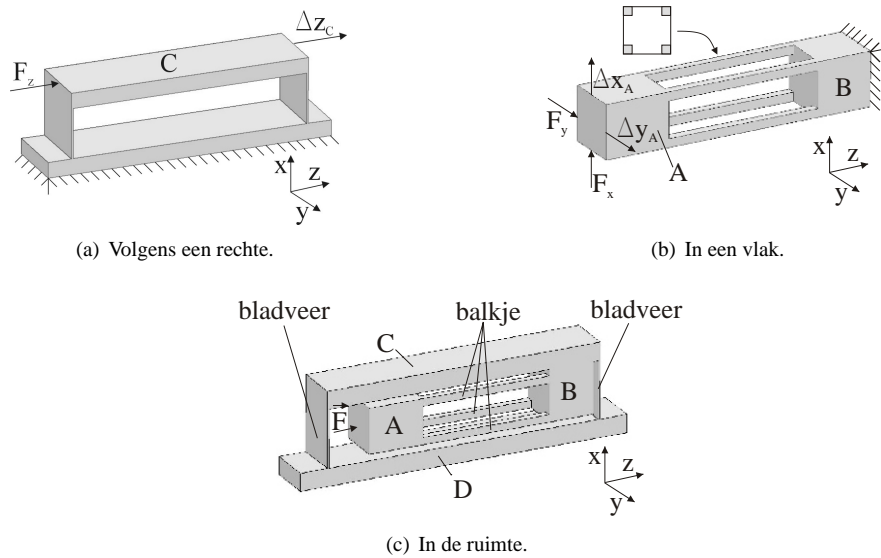
Figuur 4.28: Het concept van de krachtsensor.

De verplaatsing van het punt P kan gegenereerd worden door de vullinghouder te transleren of te roteren. Figuur 4.29 toont beide alternatieven. In het eerste alternatief zet de flexibele structuur de krachten  $[F_x \ F_y \ F_z]$  om in een zuivere translatie  $[\Delta x_v \ \Delta y_v \ \Delta z_v]$  van de vullinghouder. Bij gelijke stijfheid in alle richtingen, reageert deze structuur exact hetzelfde voor alle assen. De verplaatsing  $[\Delta x_P \ \Delta y_P \ \Delta z_P]$  van het punt P is uiteraard gelijk aan  $[\Delta x_v \ \Delta y_v \ \Delta z_v]$ . In het tweede alternatief worden de x-, y- en z-component van de kracht respectievelijk omgezet naar twee rotaties ( $\beta$  en  $\gamma$ ) en een translatie  $\Delta z$  van de vullinghouder. Dit alternatief meet dus de momenten  $M_y$  en  $M_x$  veroorzaakt door de x- en y-component van de kracht. Hierdoor is de insteekdiepte  $l_1$  van de vulling belangrijk. Aangezien de vulling regelmatig vervangen wordt, zonder de sensor te herkalibreren, moet de insteekdiepte zeer reproduceerbaar

zijn. Een bijkomend nadeel is de grote hefboomsarm voor de x- en y-krachten, waardoor deze assen een grotere gevoeligheid hebben dan de z-as. Het eerste alternatief, gebaseerd op de omzetting van de drie krachten naar drie translaties, heeft deze nadelen niet en wordt daarom verder uitgewerkt.



Figuur 4.29: Twee alternatieven voor het omzetten van de kracht naar de verplaatsing van punt P.



Figuur 4.30: Basisstructuren voor genereren van een zuivere translatie.



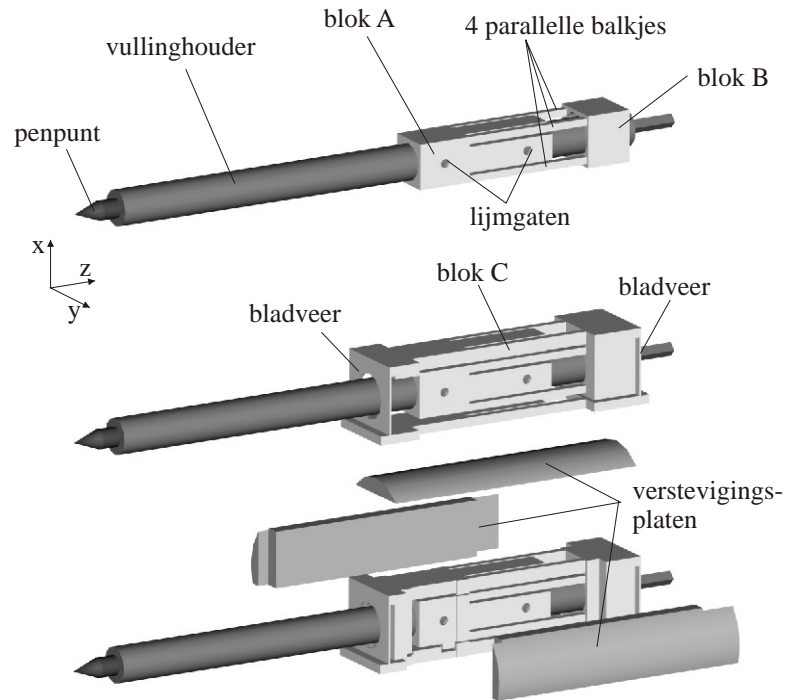
### Ontwerp flexibele structuur

De eerste stap in het ontwerp is de ontwikkeling van de basisstructuur die de kracht omzet naar een zuivere translatie in drie richtingen. Figuur 4.30(a) toont de basisstructuur voor het genereren van een translatie in één richting. Deze structuur bestaat uit twee parallelle bladveren. Wanneer de kracht  $F_z$  aangelegd wordt, verplaatst de bovenste blok over een afstand  $\Delta z_C$ . De overige krachten en momenten genereren geen beweging in de structuur. De kracht  $F_z$  is dus ontkoppeld van de overige krachten en momenten. Figuur 4.30(b) toont de basisstructuur voor het genereren van een zuivere translatie in twee richtingen. De structuur bestaat uit vier parallelle balken met een vierkante of ronde doorsnede, die allemaal dezelfde afmetingen en dus dezelfde stijfheid hebben. De krachten  $F_x$  en  $F_y$  genereren respectievelijk een translatie  $\Delta x_A$  en  $\Delta y_A$ . De kracht  $F_z$  en de momenten  $M_x$  en  $M_y$  genereren geen verplaatsing of rotatie omwille van de hoge stijfheid in die richtingen. Het moment  $M_z$  veroorzaakt wel een torsie van de structuur rond de z-as. Voor het genereren van een zuivere translatie in drie richtingen wordt de basisstructuur van figuur 4.30(a) in serie geplaatst met het basisstructuur van figuur 4.30(b). Hierbij is het belangrijk dat de vier parallelle balken tussen de twee bladveren staan. Op deze manier vergroot de afstand tussen beide bladveren, waardoor de krachten - en dus de spanningen - in de bladveren onder invloed van de momenten  $M_x$  en  $M_y$  verkleinen. Figuur 4.30(c) toont de uiteindelijke structuur voor het genereren van een zuivere translatie in drie richtingen. Deze structuur ontkoppelt de drie componenten van de kracht op blok A in drie translaties. Tevens is de structuur ongevoelig voor momenten  $M_x$  en  $M_y$  die op blok A aangrijpen. De lage torsiestijfheid rond de z-as vormt geen probleem daar het moment  $M_z$  tijdens het schrijven niet optreedt.

Figuur 4.31 toont de flexibele structuur van de krachtsensor. Centraal staat de vullinghouder, die vastgelijmd is in een boring door blok A. Ten opzichte van figuur 4.30(c) is blok A in de z-richting verlengd, zodanig dat de vullinghouder over een grote lengte vastgelijmd is. Tevens is blok A voorzien van twee lijmgaten, waarlangs de vloeibare lijm aangebracht wordt. Blok A is door vier parallelle balkjes verbonden met blok B. Deze balkjes maken de beweging van de vullinghouder in de x- en y-richting mogelijk. In blok B is een boring voorzien om plaats te maken voor de vullinghouder. Rond deze constructie wordt het één-assige vervormingsmechanisme met twee parallelle bladveren gebouwd, dat de beweging van de vullinghouder in de z-richting mogelijk maakt. De bladveren zijn voorzien van een boring om de vullinghouder door te laten. De verlaging van de stijfheid van de bladveer door de boring wordt gecompenseerd door een verbreding van de bladveren. Om de buigstijfheid van het blok BC te vergroten, worden metalen verstevigingsplaatjes tegen de zijkant en bovenkant gelijmd. Op deze manier is de soepelheid van de blokken B en C verwaarloosbaar ten opzichte van de soepelheid van de balkjes en de bladveren. Hierdoor is een eindige elementen analyse overbodig en kunnen de balkjes en bladveren gedimensioneerd worden met de formule voor een dubbel ingeklemde balk:

$$k = \frac{Ebt^3}{l^3} \quad (4.7)$$

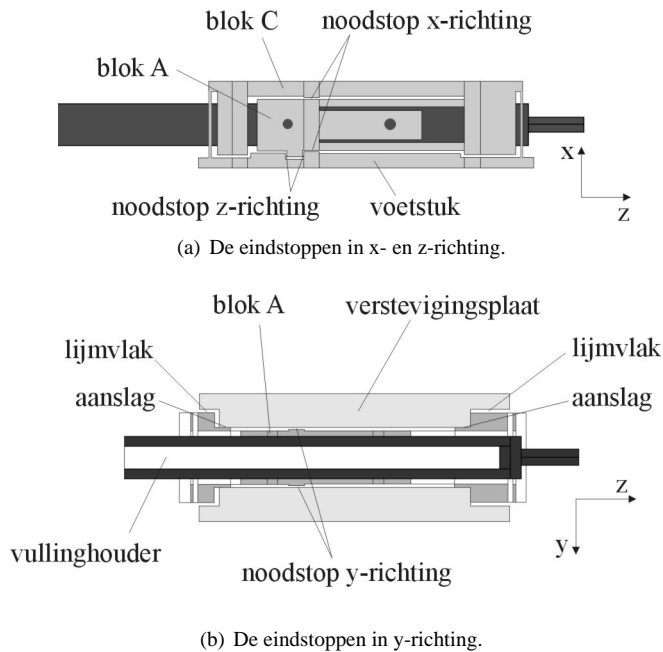
met  $k$  de stijfheid van het balkje,  $E$  de elasticiteitsmodulus,  $b$  de breedte van het balkje,  $t$  de dikte van het balkje en  $l$  de lengte van het balkje. Hierbij zijn de balkjes en



Figuur 4.31: De flexibele structuur van de krachtsensor.

de bladveren gedimensioneerd op gelijke stijfheid van  $40\text{N/mm}$  in alle richtingen. Op deze manier is de helft van de maximale doorbuiging van de penpunt ten opzichte van de behuizing ( $0.1\text{mm}$  onder  $2\text{N}$ ) gesitueerd in de flexibele structuur van de krachtsensor. De afmetingen van de balkjes bedraagt  $0.8\text{mm} \times 0.8\text{mm} \times 14.2\text{mm}$  en die van de bladveren bedraagt  $6.4\text{mm} \times 8.4\text{mm} \times 0.22\text{mm}$ .

Vervolgens worden de eindstoppen in de mechanische structuur geïntegreerd. Deze eindstoppen zijn nodig om de vervorming van de balkjes en bladveren te beperken wanneer de krachtsensor aan een overbelasting blootgesteld wordt. Figuur 4.32(a) toont de eindstoppen voor de  $x$ - en  $z$ -richting. De opening tussen blok A en blok C wordt plaatselijk versmald tot  $130\mu\text{m}$ . Hierdoor zal bij een overbelasting van de krachtsensor, blok A tegen blok C komen voordat de balken plastisch vervormen. Op die manier wordt de kracht afgeleid zonder de fragiele onderdelen te beschadigen. De eindstop voor de  $z$ -richting bestaat uit een tand onderaan blok A, die in een gleuf in de basisplaat zit. Bij overbelasting in de  $z$ -richting raakt deze tand de zijwanden van de gleuf waardoor de vervormingen van de bladveren beperkt blijven. Figuur 4.32(b) toont de eindstoppen in de  $y$ -richting. Deze eindstoppen worden gevormd door de verstevigingsplaatjes die aan weerszijde van de krachtsensor gelijmd worden. De spleet tussen blok A en beide verstevigingsplaatjes bedraagt  $130\mu\text{m}$ . Om deze afstand nauwkeurig te realiseren, is de krachtsensor voorzien van speciale aanslagen waartegen het



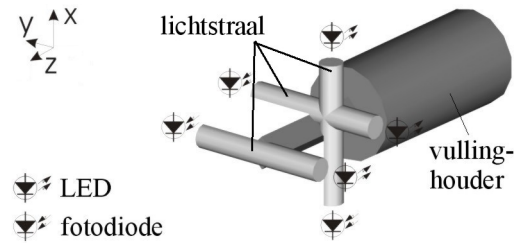
Figuur 4.32: De integratie van de eindstoppen in de structuur.

verstevigingsplaatje geplaatst wordt. Om te beletten dat de dikte van de lijm een rol speelt, zijn speciale lijmvlakken voorzien. Wanneer het verstevigingsplaatje tegen de aanslagen zit, bestaat tussen deze lijmvlakken en het verstevigingsplaatje een functionele spleet, die opgevuld wordt met een lijm met een vullend vermogen. De nauwkeurigheid van de eindstop wordt dus enkel bepaald door de nauwkeurigheid van de aanslagen. Aangezien deze aanslagen met behulp van vonkersie gemaakt worden, bedraagt de nauwkeurigheid van deze aanslag  $5\mu\text{m}$ .

#### Ontwerp drie-assig, optisch verplaatsingsmeetsysteem

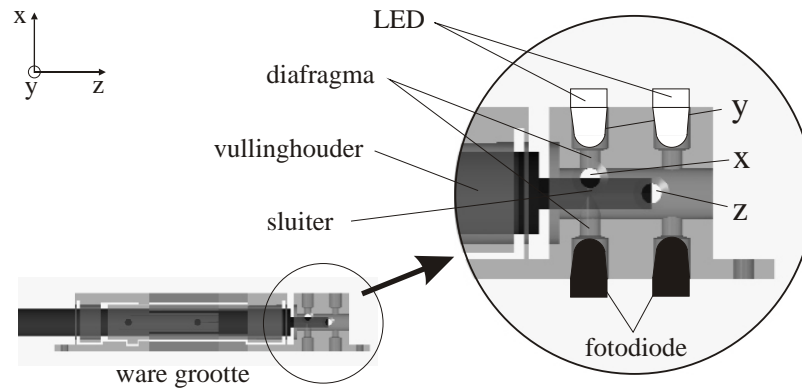
Het optische verplaatsingsmeetsysteem meet de translatie van de vullinghouder in drie richtingen. Figuur 4.33 toont het principe. Een vierkante staaf, die aan het uiteinde van de vullinghouder bevestigd is, onderbreekt drie lichtstralen voor de helft. De eerste horizontale lichtstraal wordt door het uiteinde van de staaf afgesneden. Deze lichtstraal detecteert de beweging in de z-richting. De verticale straal wordt door een rib van de staaf afgesneden en detecteert de beweging in de y-richting. Analoog meet de derde lichtstraal de beweging in de x-richting.

Belangrijk bij dit concept is dat de LED en fotodiode nauwkeurig tegenover elkaar gepositioneerd worden. Bovendien moet ook de vullinghouder nauwkeurig gepositioneerd worden ten opzichte van het optische meetsysteem. Dit wordt gegarandeerd door het optische meetsysteem te integreren met de flexibele structuur. Figuur 4.34 toont de totale structuur. Het optische meetsysteem bestaat uit een vierkant blok waar-



Figuur 4.33: Het 3D optisch meetsysteem.

in boringen voorzien zijn om de LED en fotodiode tegenover elkaar te positioneren. Om te vermijden dat het licht van één LED op meerdere fotodiodes valt, worden zowel bij de LED als bij de fotodiode diafragma's voorzien. Deze diafragma's hebben een diameter van 1mm.



Figuur 4.34: De structuur van het 3D optisch meetsysteem.

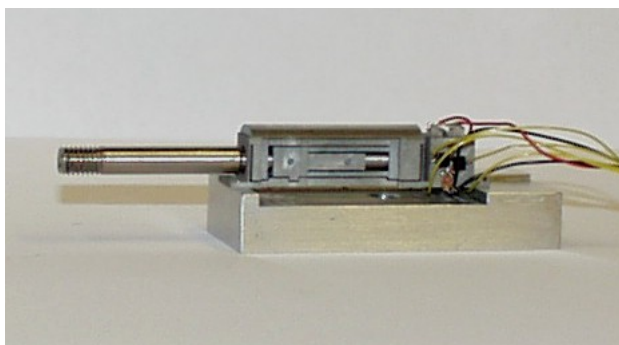
Tot slot wordt het optische meetsysteem voorzien van een extra LED en fotodiode om de temperatuur en andere storingen te compenseren. De lichtstraal van deze LED wordt niet onderbroken door de bewegende sluiters. De fotodiode meet bijgevolg enkel storingen ten gevolge van bijvoorbeeld temperatuursveranderingen en fluctuaties in de voedingsspanning.

#### 4.4.4 Realisatie prototype

De volgende stap in de ontwikkeling van de optische krachtsensor is het maken van een prototype. Eerst worden de verschillende onderdelen geproduceerd met behulp van vonkersie [109, 110]. Deze productietechniek laat toe om zeer nauwkeurig kleine stukken te maken. De gebruikte productiemachine is de Robofill2000 van Charmilles

Technologies, die een draad van  $100\mu\text{m}$  gebruikt als elektrode.

Vervolgens worden de verschillende onderdelen geassembleerd. Eerst wordt de vullinghouder vastgelijmd in de flexibele structuur. Hierbij is het belangrijk dat de sluitersluiting op het uiteinde van de vullinghouder correct gepositioneerd is ten opzichte van het optische meetsysteem. De sluitersluiting moet immers, bij afwezigheid van een externe kracht, de helft van elke lichtstraal afschermen. Om deze positionering te garanderen, worden metalen pinnen door de diafragma's gestoken. Deze metalen pinnen hebben een diameter van  $0.5\text{mm}$ , wat de helft van de diafragma's is. Na het positioneren van de vullinghouder tegen deze metalen pinnen, wordt de lijm (Loctite® 641) via de lijmgaten aangebracht. Wanneer de lijm uitgehard is, worden de metalen pinnen verwijderd. Vervolgens worden de verstevigingsplaatjes met X60 (Höttinger Baldwin Messtechnik) vastgelijmd. In de laatste stap worden de LEDs en fotodiodes met Loctite® 406 vastgelijmd in de daartoe voorziene gaten. Figuur 4.35 toont de uiteindelijke sensor. De zijverstevigingsplaat is weggelaten zodanig dat de interne structuur zichtbaar is. De afmetingen (zonder de vullinghouder) bedragen  $\phi 12\text{mm} \times 45.6\text{mm}$ .



Figuur 4.35: De optische krachtsensor (zonder zijverstevigingsplaat).

#### 4.4.5 Testen

Het prototype is uitvoerig getest om alle specificaties van de krachtsensor te evalueren.

Een eerste proef bepaalt de gevoeligheid en de repeteerbaarheid van de krachtsensor. De sensor wordt tien keer onderworpen aan een kracht van  $1.955\text{N}$  door een gewicht aan het uiteinde van de vullinghouder te bevestigen. Het gemiddelde van deze tien metingen gedeeld door het aangelegde gewicht geeft de gevoeligheid. De spreiding op deze tien metingen is een maat voor de repeteerbaarheid. De resultaten staan in tabel 4.8 opgesomd. Het verschil in gevoeligheden tussen de drie assen wordt onder andere veroorzaakt door de variatie op de stralingssterkte van de LED en de gevoeligheid van de fotodiode. Volgens de specificaties van deze componenten bestaat hierop een factor drie verschil tussen de minimum en maximum gegarandeerde waarde.

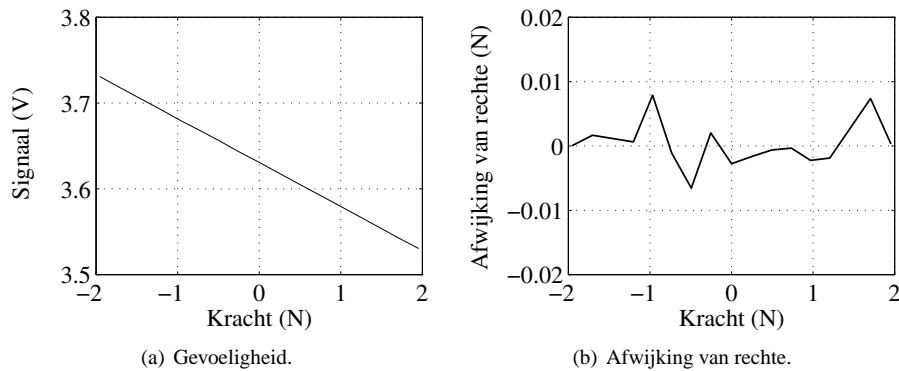
De tweede proef bepaalt de resolutie van de sensor. De resolutie is gedefinieerd als de kracht die dezelfde signaalgrootte heeft als het ruisniveau op het signaal. Het ruisniveau wordt bepaald door gedurende 13 seconden het signaal van een onbelaste kracht-

Tabel 4.8: De gevoeligheid en repeteerbaarheid.

	gevoeligheid (mV/N)	repeteerbaarheid $2\sigma$ (N)
x-as	94.6	0.020
y-as	53.2	0.028
z-as	145.8	0.002

sensor te meten. De effectieve waarde van de ruis op het signaal van de y-as bedraagt 0.42mV. De resolutie is bijgevolg gelijk aan  $2 * \sigma_{ruis}/gevoeligheid = 0.016N$ . Anaaloog is de resolutie van de x-as en z-as respectievelijk gelijk aan 0.010N en 0.006N. Door het signaal te filteren (laagdoorlaat, Butterworth, 1e orde, 100Hz) halveert het ruisniveau en verdubbelt de resolutie.

De derde proef controleert de lineariteit van de sensor. De proef bestaat uit het aanleggen van verschillende gekende krachten in het volledige bereik van -2N tot 2N. Het aanleggen van deze kracht gebeurt door aan het uiteinde van de vullinghouder gewichten te bevestigen. De negatieve krachten worden aangelegd door de sensor  $180^\circ$  om te draaien en terug gewichten te bevestigen. Het resultaat van y-as staat in figuur 4.36(a). De kleinste kwadraten rechte door deze grafiek heeft een helling van 51.5mV/N. Dit komt overeen met de waarde uit tabel 4.8. De afwijking op deze rechte is getoond in figuur 4.36(b). De maximale fout (0.008N) is kleiner dan de resolutie. De niet-lineariteit van de sensor is dus verwaarloosbaar. Dit resultaat is te verwachten daar het optisch meetsysteem lineair is en de flexibele structuur enkel in het lineaire gebied vervormt.



Figuur 4.36: Lineariteit en gevoeligheid van y-as

Uit deze proef kunnen tevens de kruisgevoeligheden bepaald worden. Het volgende verband bestaat er tussen de drie signalen  $[V_1 V_2 V_3]$  en de krachten  $[F_x F_y F_z]$ :

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -94.1 & -3.7 & 1.4 \\ 1.9 & -51.5 & -1.0 \\ -0.3 & 0.8 & -145.1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix}, \quad (4.8)$$

met de kracht en spanning respectievelijk uitgedrukt in Newton en millivolt. Op de diagonaal staat de gevoelheden van de verschillende assen. Deze komen overeen met de waardes in tabel 4.8. De niet-diagonaal elementen geven de kruisgevoelheden weer. De hoogste kruisgevoeligheid bevindt zich tussen de x-as en de y-as en is 3.9%. De inverse verband van vergelijking (4.8) is:

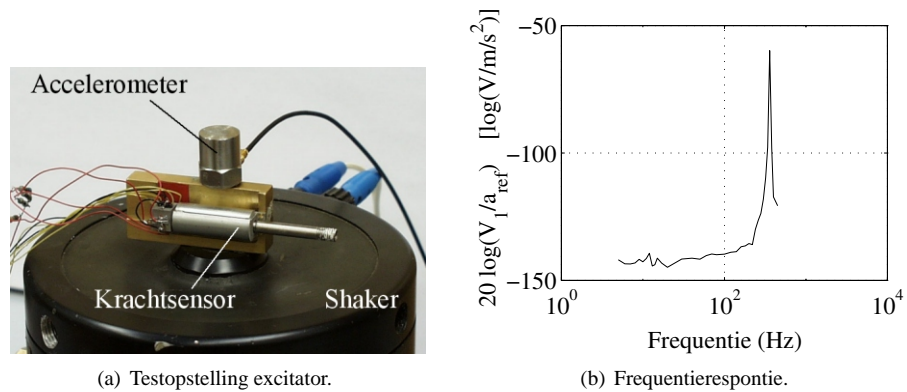
$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.01061 & 0.00077 & -0.00011 \\ -0.00038 & -0.01939 & 0.00013 \\ 0.00002 & -0.00011 & -0.00689 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}. \quad (4.9)$$

Wanneer dit verband gebruikt wordt om de krachten te berekenen en deze te vergelijken met de werkelijk aangelegde krachten, blijkt de fout ( $2\sigma$ ) kleiner dan 0.02N te zijn.

Een volgende specificatie is de stijfheid, die minimaal 20N/mm moet bedragen. De stijfheid wordt bepaald op basis van de vervorming van de flexibele structuur onder invloed van een gekende externe kracht. De verplaatsing in de y-richting wordt gemeten met een Tesa-taster, die tegen blok A staat. Voor de y-as geeft dit een verplaatsing van  $90\mu\text{m}$  onder een last van 1.9N. Dit komt overeen met een stijfheid van 21N/mm. Analooq bekomt men voor de x- en z-as respectievelijk 16N/mm en 20N/mm. Deze stijfheid is slechts de helft van de berekende stijfheid. Het verschil tussen de berekeningen en deze proeven ligt bij blok D van de sensor. Tijdens het ontwerp is deze oneindig stijf verondersteld omdat dit blok aan de penbehuizing vastgelijmd wordt. Bij deze proef is blok D slechts aan beide uiteinden vastgemaakt door middel van schroeven om de-assemblage mogelijk te maken. Blok D buigt bijgevolg door, waardoor de hele structuur een rotatie ondergaat. In een bijkomende proef is deze rotatie opgemeten met behulp van een laser en spiegel, vastgemaakt aan blok A. De rotatie onder een last van 1.9N bedraagt  $0.31^\circ$ . Over een afstand van 15mm geeft deze hoekverdraaiing een verplaatsing van  $54\mu\text{m}$ , wat de helft van de gemeten doorbuiging is. De hoekrotatie is dus de oorzaak van de halvering van de stijfheid. Wanneer de sensor in de uiteindelijke behuizing vastgelijmd is, verdwijnt dit probleem automatisch op voorwaarde dat een stijve lijm gebruikt wordt.

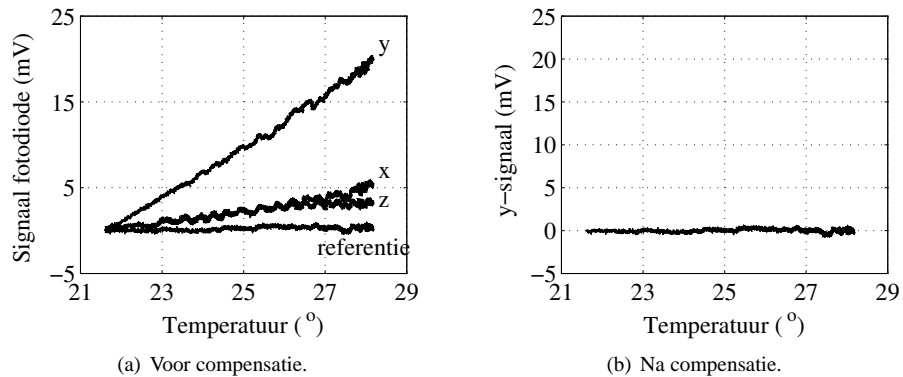
Om het frequentiespectrum van de sensor te testen is de krachtsensor onderworpen aan een zuivere sinusoidale versnelling  $a$ . Door de massa  $m$  van de vullinghouder, komt dit overeen met het aanleggen van een sinusoidale kracht  $-ma$  op de penpunt. Figuur 4.37(a) toont de testopstelling. De krachtsensor is samen met een geijkte accelerometer (B&K4366) gemonteerd op een excitator (B&K4809), die een zuivere sinusoidale trilling oplegt. Voor verschillende frequenties is telkens het signaal van de accelerometer en de krachtsensor gemeten. De verhouding tussen beide signalen is een maat voor de gevoeligheid van de krachtsensor op die frequentie. Figuur 4.37(b) toont het resultaat voor de y-as. De resonantiepiek ligt op 360Hz. Voor de x-as en z-as ligt de resonantiefrequentie respectievelijk op 360Hz en 320Hz.

Een laatste belangrijke karakteristiek is de drift van de krachtsensor. Bij constant blijvende temperatuur is deze verwaarloosbaar. Wanneer de temperatuur varieert, treedt er wel drift op. Om deze temperatuursafhankelijkheid te karakteriseren, is een proef gedaan waarbij de temperatuur van de krachtsensor verhoogt wordt van  $21.5^\circ\text{C}$  tot  $28.2^\circ\text{C}$ . Figuur 4.38(a) toont het x-, y-, z-sig-naal en het signaal van het extra LED-fotodiodepaar in functie van de temperatuur. Het signaal van het extra LED-



Figuur 4.37: Evaluatie bovenste grens frequentiebereik.

fotodiodepaar is onafhankelijk van de temperatuur en kan hierdoor niet gebruikt worden om de temperatuur te compenseren. De temperatuursgevoeligheid van de andere signalen zijn bijgevolg niet veroorzaakt door de opwarming van de LED en fotodiode, maar wel door de thermische vervorming van de mechanische structuur, waardoor de sluiters beweegt. Het extra LED-fotodiode-paar is dus overbodig. Om de temperatuursgevoeligheid van de andere signalen te compenseren, moet de temperatuur opgemeten worden met een extra temperatuursensor. Hierbij bestaat de temperatuurscompensatie uit een correctieterm die lineair met de temperatuur toeneemt. Het resultaat van deze compensatie voor het y-sigitaal is te zien in figuur 4.38(b). De temperatuursgevoeligheid is volledig gecompenseerd. De drift kan ook software-matig gecompenseerd worden door rekening te houden met de meetdata terwijl de sensor onbelast is (pen in de lucht). Deze methode is in paragraaf 6.2 uitgewerkt.



Figuur 4.38: Temperatuursgevoeligheid.



#### 4.4.6 Richtlijnen voor toekomstige verbeteringen

Het huidige ontwerp van de krachtsensor heeft twee minpunten:

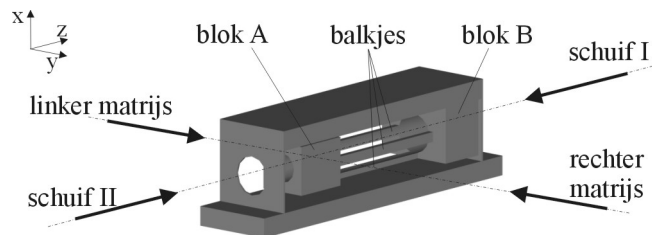
- De kostprijs van de basisstructuur is te hoog omdat hij vervaardigd wordt door middel van vonkersie. Vonkersie is immers een traag en dus duur productieproces.
- De krachtsensor hangt vast aan het uiteinde van de vullinghouder, waarbij het optische meetsysteem achter de inktvulling zit. Hierdoor verkleint de overblijvende ruimte in de pen. Bovendien ondervindt de krachtsensor door de grote afstand tussen penpunt en krachtsensor een groot moment.

Deze paragraaf bevat enkele richtlijnen om deze minpunten mogelijk te verbeteren.

##### Kostprijs van de structuur

In het huidige ontwerp wordt de monolithische basisstructuur van de sensor door middel van vonkersie vervaardigd. Deze productietechniek is zeer geschikt voor het maken van prototypes, maar is te duur voor de uiteindelijk beoogde toepassing. Om deze sensor goedkoop en in grote aantallen te produceren, moet de basisstructuur met spuitgieten gemaakt worden. Hiervoor moet de vorm van de monolithische structuur van de sensor aangepast worden om het spuitgieten mogelijk te maken en het aantal delen van de matrijs te beperken. Dit kan als volgt.

De matrijs voor de krachtsensor bestaat uit twee hoofddelen, die in de y-richting opengaan. In het huidige ontwerp liggen de vier balkjes twee aan twee achter elkaar in de y-richting, waardoor de twee matrijsdelen de tussenliggende ruimte niet kunnen opvullen. Daarom moet de positie van de balkjes aangepast worden. Figuur 4.39 toont de verbeterde structuur. De balkjes staan niet meer op de hoekpunten van blok A, maar op de middelpunten van de ribben van blok A. Het linker en rechter balkje liggen nog achter elkaar in de y-richting, maar de ruimte tussen beide balkjes wordt opgevuld door een schuif die toch nodig is om de boring doorheen blok A, B en één bladveer te realiseren. Voor de boring door de tweede bladveer is een tweede schuif voorzien, die langs de andere kant nadert. Deze bijkomende schuif is nodig omdat de structuur drie verschillende binnendiameters heeft, waarvan de middelste de kleinste is.



Figuur 4.39: Verbeterde flexibele structuur.

Het optische meetsysteem kan in dezelfde matrix geïntegreerd worden. De positioneringsgaatjes en diafragma's van de LEDs en fotodiodes in de linker- en rechterwand, worden in de twee helften van de matrix geïntegreerd. De positioneringsgaatjes en diafragma's voor de LEDs en fotodiode aan de boven- en onderkant worden met een nabewerking gerealiseerd. Het voorzien van twee extra schuiven voor deze openingen weegt immers niet op tegen deze eenvoudige nabewerking.

Naast het aanpassen van de vorm van de structuur, moeten de afmetingen van de structuur herberekend worden. Het spuitgieten vereist immers een ander basismateriaal. Bij de keuze van een kunststof moet gelet worden op een groot lineair vervormingsgebied, opdat de structuur lineair zou vervormen.

### Herontwerp optisch meetsysteem

Zoals figuur 4.34 toont, is de krachtsensor op het uiteinde van de vullinghouder bevestigd omdat de binnendiameter van het optische meetsysteem slechts 2mm bedraagt. Opdat de vullinghouder door het optische meetsysteem kan steken, moet deze binnendiameter vergroot worden tot 5mm. De hele krachtsensor zit dan rond de vullinghouder, waardoor er meer plaats vrij komt in de pen. Bovendien kan de krachtsensor dan dicht tegen de penpunt gemonteerd worden, zodat de hefboomsarm en dus het moment op de krachtsensor verkleint.

Om de binnendiameter te vergroten tot 5mm, moeten de lichtstralen van het optische meetsysteem meer uit het centrum geplaatst worden. De beschikbare ruimte is daar echter kleiner, waardoor de huidige optische componenten niet meer voldoen. Een overschakeling naar 0603 verpakkingen (1.6mm x 0.8mm x 1.1mm) maakt de montage eventueel wel mogelijk. Deze kleinere componenten hebben echter geen ingebouwde lenzen, zodanig dat de stralingssterkte van de LED en de gevoeligheid van de fotodiode lager liggen. Dit resulteert in een kleiner signaal van de fotodiode, waardoor de actieve stroom-spanningsomzetting een grotere versterkingsfactor nodig heeft.

Daar de vullinghouder door dit herontwerp door het optische meetsysteem steekt, wordt de sluitersluiting op het uiteinde van de vullinghouder vervangen door uitstulpingen op de omtrek van de vullinghouder.

### 4.4.7 Bespreking

Voor de bespreking van de krachtsensor worden de verschillende specificaties vermeld in tabel 4.1 overlopen en vergeleken met de testen die in paragraaf 4.4.5 beschreven zijn.

**Bereik** De sensor heeft een bereik van  $\pm 2.6\text{N}$ . Wanneer de belasting groter is, treden de eindstoppen in werking om de sensor te beschermen. Van zodra de overbelasting verdwijnt, zijn de metingen terug waardevol.

**Nauwkeurigheid** De resolutie van de sensor bedraagt 0.008N. De repeteerbaarheid bedraagt 0.02N. De niet-lineariteit is verwaarloosbaar. Door de kruisgevoeligheden

via de matrix (4.9) in rekening te brengen, wordt een nauwkeurigheid van 0.02N bereikt.

**Frequentiegebied** De krachtsensor meet vanaf DC, aangezien het optische meetstelsel statische metingen toelaat. De bovenste frequentielimiet wordt gevormd door de resonantiefrequentie, die boven 300Hz ligt. Bijgevolg is de sensor in staat om het volledige frequentiespectrum van de schrijfkrachten - dit is van 0 tot 20Hz - te meten.

**Stijfheid** De opgemeten stijfheid van de sensor ligt rond 20N/mm. Dit is het helft van de berekende stijfheid. Deze halvering van stijfheid is te wijten aan de doorbuiging van blok D. Wanneer de sensor in de penbehuizing vastgelijmd wordt, zal deze doorbuiging niet meer optreden. Het vastlijmen van de krachtsensor zorgt dus voor een verhoogde stijfheid, waardoor de gevoeligheid van de sensor verandert. De kalibratie van de sensor moet bijgevolg steeds na montage in de pen gebeuren.

**Afmetingen** De sensor past in een cilinder met diameter 12mm. Tevens is er plaats voorzien voor de inktvulling. Verbetering van het ontwerp is mogelijk door het optische meetstelsel te herontwerpen zodat het niet achter maar rond de vullinghouder zit. Op die manier komt er extra plaats vrij in de pen.

**Robuustheid** De sensor heeft ingebouwde eindstoppen die de beweging van de vullinghouder stoppen voordat de flexibele onderdelen plastisch vervormen. Deze eindstoppen zijn geïntegreerd in de basisstructuur waardoor de toleranties van de eindstoppen eenvoudig gehaald worden.

**Temperatuurstabiliteit** De temperatuursafhankelijkheid van de sensor is beperkt. Door gebruik te maken van een temperatuursensor werd deze invloed volledig softwarematig gecompenseerd.

**Kostprijs** De kostprijspecificatie wordt met het huidige ontwerp niet gehaald. De oorzaak ligt bij de hoge productiekostprijs van de basisstructuur, die met vonkerosie gemaakt wordt. Herwerking naar een spuitgegoten structuur is echter mogelijk waardoor de kostprijs sterk verlaagt. De kostprijs van de overige onderdelen en de optische componenten is wel voldoende laag.

## 4.5 Besluit

Uit het overzicht van de verschillende meetprincipes voor krachten, blijken twee meetprincipes interessant voor het maken van miniatuurkrachtsensoren in een computerpen.

Het eerste uitgewerkte meetprincipe is gebaseerd op de piëzo-buis van Xinetics, waarin drie piëzo-elementen geïntegreerd zijn. Deze sensor heeft een hoge gevoeligheid en compacte afmetingen. Alhoewel theoretisch statische metingen niet mogelijk zijn, kunnen frequenties tot  $32 \cdot 10^{-6}$ Hz gemeten worden. De sensor heeft echter een

hoge temperatuursgevoeligheid, die ondanks verschillende compensatietechnieken te groot blijft. De sensor is bijgevolg enkel geschikt voor omgevingen waar de temperatuur constant blijft. In een computerpen varieert de temperatuur door de warmte van de hand, waardoor deze krachtsensor niet geschikt is voor deze toepassing.

Het tweede uitgewerkte alternatief is een optische krachtsensor. Deze sensor is gebaseerd op een flexibele structuur die de drie componenten van de kracht op de penpunt ontkoppelt naar drie translaties van de vullinghouder. Deze translaties worden gemeten door een optisch meetsysteem, dat zich achter de vullinghouder bevindt. Dit meetsysteem bestaat uit drie vaste infrarood LED-fotodiode paren waartussen een sluiters beweegt. Het ontwerp resulteert in een miniatuurkrachtsensor met een diameter van 12mm en een lengte van 45.6mm. De uitgebreide testen op het prototype tonen het potentieel van dit ontwerp aan. De specificaties in verband met bereik, nauwkeurigheid, frequentiebereik, stijfheid, afmetingen, robuustheid en temperatuursgevoeligheid worden gehaald. Enkel de specificatie met betrekking tot de kostprijs wordt niet gehaald vanwege de hoge kostprijs van de basisstructuur. Herwerking naar een spuitgegoten structuur is echter mogelijk, waardoor deze specificatie uiteindelijk wel gehaald kan worden.

## Hoofdstuk 5

# Wrijvingsmodel

*Voor het omzetten van de wrijvingskracht tussen penpunt en papier naar de snelheid van de penpunt is een wrijvingsmodel noodzakelijk. Dit wrijvingsmodel wordt in dit hoofdstuk experimenteel geïdentificeerd. Hiervoor is een speciale tribometer gebouwd, die de wrijving tussen penpunt en papier meet. Na identificatie is het wrijvingsmodel gevalideerd met behulp van een tweede testopstelling die het schrijven simuleert.*

### 5.1 Inleiding tot wrijving

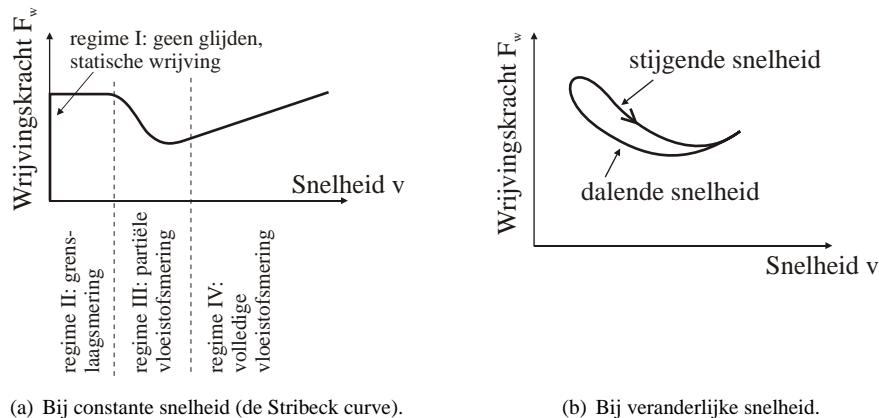
Wrijving is gedefinieerd als de weerstand tegen beweging die optreedt wanneer twee oppervlakken relatief ten opzichte van elkaar bewegen [111]. Deze weerstand uit zich als een wrijvingskracht, die tegengesteld is aan de beweging. Wrijving is dus geen eigenschap van één oppervlak, maar wel van de combinatie van twee oppervlakken. Bovendien wordt de wrijving ook beïnvloed door smeermiddelen of kleine partikels tussen beide oppervlakken. Voor het opstellen van een wrijvingsmodel voor deze computerpen, moet dus de combinatie van penpunt, inkt en papier bestudeerd worden.

De studie van de wrijving is het domein van de tribologie. Voor systemen met een smeermiddel zijn er vier regimes te onderscheiden [112]: statische wrijving, grenslaagsmering, partiële vloeistofsmering en volledige vloeistofsmering.

- Statische wrijving ontstaat door de elastische vervorming van de ruwheidstoppen wanneer een kleine relatieve verplaatsing tussen beide oppervlakken opgelegd wordt. De grootteorde van deze verplaatsing bedraagt typisch 1-10  $\mu\text{m}$ . Macroscopisch geeft dit aanleiding tot een wrijvingskracht die evenredig is met de verplaatsing en onafhankelijk is van de snelheid. Deze relatie geldt tot een bepaalde maximale wrijvingskracht. Boven deze kracht worden de elastische verbindingen tussen de ruwheidstoppen verbroken en treedt er slip op.
- Grenslaagsmering treedt op bij lage snelheden. Door de normaalkracht en de lage snelheid, wordt het smeermiddel tussen beide oppervlakken weggeperst. Bijgevolg wordt de normaalkracht volledig gedragen door het contact tussen de

ruwheidstoppen. Bij een relatieve beweging tussen beide oppervlakken ontstaat een wrijvingskracht door het verbreken van adhesieverbindingen tussen ruwheidstoppen en door vervorming van de ruwheidstoppen. Dit type van wrijving is in grote mate onafhankelijk van de snelheid.

- Partiële vloeistofsmering treedt op bij hogere snelheden. Door deze hogere snelheden wordt het smeermiddel tussen beide oppervlakken getrokken, waardoor een vloeistoffilm tussen beide oppervlakken ontstaat. De dikte van deze vloeistoffilm wordt bepaald door de relatieve snelheid, de viscositeit van het smeermiddel en de geometrie van de oppervlakken. Bij partiële vloeistofsmering is deze vloeistoffilm dunner dan de hoogte van de ruwheidstoppen. Bijgevolg wordt de contactkracht tussen beide oppervlakken deels gedragen door een drukopbouw in het smeermiddel en deels door de ruwheidstoppen. Aangezien adhesie tussen ruwheidstoppen en vervorming van ruwheidstoppen hierdoor afneemt, wordt deze vorm van wrijving gekenmerkt door een dalende wrijvingskracht bij toenemende snelheid.
- Volledige vloeistofsmering treedt op bij hoge snelheden. De vloeistoffilm tussen beide oppervlakken is dikker dan de hoogte van de ruwheidstoppen. De volledige contactkracht wordt bijgevolg gedragen door de drukopbouw in de vloeistof. Doordat er geen rechtstreeks contact is tussen beide oppervlakken, treden adhesie en vervorming van de ruwheidstoppen niet op. De wrijvingskrachten worden voornamelijk veroorzaakt door de afschuifkrachten in het smeermiddel. Bijgevolg kenmerkt dit regime zich door een lage wrijvingskracht, die toeneemt naarmate de snelheid stijgt.



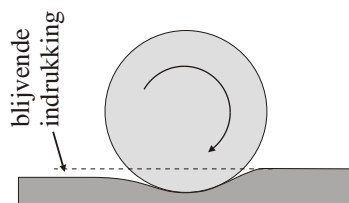
Figuur 5.1: Het verband tussen snelheid en wrijvingskracht.

De Stribeck-curve, getoond in figuur 5.1(a), vat deze vier wrijvingstypes samen. Op deze figuur is duidelijk te zien dat het eerste en tweede wrijvingstype ongeschikt zijn om de snelheid te bepalen vertrekkend van een krachtmeting. Bovendien moet

het derde wrijvingsstype vermeden worden, zodat er een eenduidig verband bestaat tussen wrijvingskracht en snelheid. De wrijving tussen penpunt en papier moet dus van het vierde wrijvingsstype zijn opdat de snelheid uit een krachtmeting bepaald kan worden.

De Stribeck-curve in figuur 5.1(a) geldt enkel voor een regimetoestand, waarbij de snelheid constant is. Wanneer de snelheid continu varieert, treden dynamische fenomenen op. Armstrong-Hélouvy [112] geeft een overzicht van deze dynamische fenomenen. De meest bekende dynamische fenomenen zijn stick-slip en een tijdsvertraging tussen snelheid en wrijvingskracht.

- Bij stick-slip wisselt een stick-fase, waarbij beide oppervlakken aan elkaar kleven, continu af met een slip-fase, waarbij de oppervlakken ten opzichte van elkaar bewegen. Tijdens de stick-fase neemt de statische wrijvingskracht toe tot de maximale statische wrijvingskracht bereikt wordt. Vervolgens wordt het elastisch contact tussen beide oppervlakken verbroken en de twee oppervlakken slippen ten opzichte van elkaar. Hierdoor neemt de wrijvingskracht af. Wanneer de wrijvingskracht te klein is voor het onderhouden van een relatieve beweging tussen beide oppervlakken, kleven beide oppervlakken terug aan elkaar (een nieuwe stick-fase).
- Een ander dynamisch fenomeen is de tijdsvertraging tussen een verandering van de snelheid en de wrijvingskracht. Dit effect uit zich door een hysteresis op het verband tussen wrijvingskracht en snelheid. Figuur 5.1(b) toont het verband tussen wrijvingskracht en snelheid wanneer een periodische snelheidsverandering boven op een constante snelheid gesuperponeerd wordt. De lus wordt volgens de wijzers van de klok doorlopen: bij stijgende snelheid is de wrijvingskracht groter dan bij dalende snelheid. De vorm van deze lus is afhankelijk van de frequentie van de periodische snelheidsverandering.



Figuur 5.2: Rolweerstand bij een kogel.

Naast een relatieve translatie van beide oppervlakken, kan één oppervlak ook rollen over een ander oppervlak. In dit geval treedt een rolweerstand op, die voornamelijk veroorzaakt wordt door vervorming [111]. Neem bijvoorbeeld een harde kogel, getoond in figuur 5.2, die over een zacht oppervlak rolt. De kogel zal aan de voorzijde steeds nieuw materiaal indrukken, terwijl aan de achterzijde dit materiaal zal terugveren. Van de energie die nodig is om de indrukking tot stand te brengen, komt een kleine fractie bij terugvering niet meer vrij door hysteresis van het materiaal en blijvende

plastische vervorming. Het resulterend energieverlies uit zich in een rolweerstand. Bij harde oppervlakken zal de wrijving bij rollen veel lager zijn dan bij transleren.

Ondanks de bestaande inzichten in de wrijving, laat de huidige stand van de tribologie niet toe om deze wrijving theoretisch te berekenen [111]. Daarom wordt de wrijving experimenteel bepaald met een tribometer.

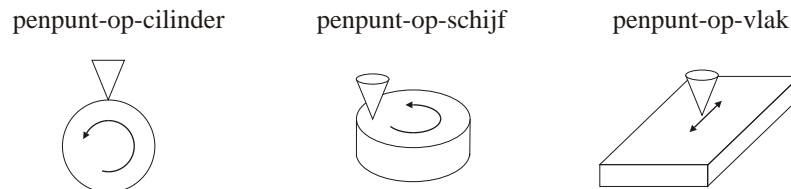
## 5.2 Ontwerp van de tribometer

Een tribometer is een meettoestel dat de wrijving tussen twee voorwerpen experimenteel bepaalt. Hierbij is het belangrijk dat het meettoestel de werkelijke situatie zo goed mogelijk benadert.

### 5.2.1 Concept

Elke tribometer is gebaseerd op hetzelfde basisprincipe: twee voorwerpen worden met een gekende normaalkracht tegen elkaar gedrukt en relatief ten opzicht van elkaar bewogen, terwijl de wrijvingskracht gemeten wordt. De manier waarop de tribometer de normaalkracht aanlegt, de relatieve beweging oplegt of de wrijvingskracht meet, varieert echter.

Het aanleggen van een gekende normaalkracht kan gebeuren met behulp van een gewicht, een gekalibreerde veer, een elektro-magneet, een pneumatische zuiger of een hydraulische zuiger. Aangezien de normaalkracht tijdens het schrijven beperkt is tot enkele Newton - zie paragraaf 2.3.3 - , is een gewicht het eenvoudigste alternatief.



Figuur 5.3: Verschillende concepten voor het genereren van relatieve beweging.

Figuur 5.3 toont de verschillende mogelijkheden om een relatieve beweging tussen penpunt en papier te genereren. Het eerste alternatief bestaat uit een penpunt die tegen de mantel van een ronddraaiende cilinder gedrukt wordt. Dit alternatief komt echter niet overeen met de werkelijke situatie tijdens het schrijven. Het papier is immers rond de cilinder gespannen, waardoor het gekromd is. Het tweede alternatief is een penpunt die tegen de zijkant van een ronddraaiende schijf gedrukt wordt. In dit geval is het papier vlak. De relatieve beweging bevat echter een rotatiecomponent, waardoor bijvoorbeeld de kogel van een kogelpen een bijkomende spin krijgt. Het derde alternatief, bestaande uit een lineair oscillerende beweging (penpunt-op-vlak), benadert



wel de werkelijke situatie tijdens het schrijven. Aangezien enkel de relatieve beweging van belang is, laat dit concept nog twee mogelijkheden open: de pen beweegt en het papier staat stil of omgekeerd. De keuze tussen beide alternatieven hangt af van de plaatsing van de krachtsensor. De krachtsensor moet immers aan het stilstaande onderdeel vastgemaakt worden om te vermijden dat de krachtsensor ook inertiële krachten meet. Stel dat de krachtsensor aan het papier vastgemaakt wordt. Door de relatieve beweging tussen penpunt en papier zal de afstand tussen de wrijvingskracht en de krachtsensor variëren. Hierdoor kan het effect van het moment op de krachtsensor moeilijk in rekening gebracht worden. Het alternatief, waarbij de krachtsensor aan de penpunt vastgemaakt is, heeft dit nadeel niet. Bijgevolg herleidt het concept zich tot een stilstaande penpunt - vastgemaakt aan de krachtsensor - en een bewegend blad papier.

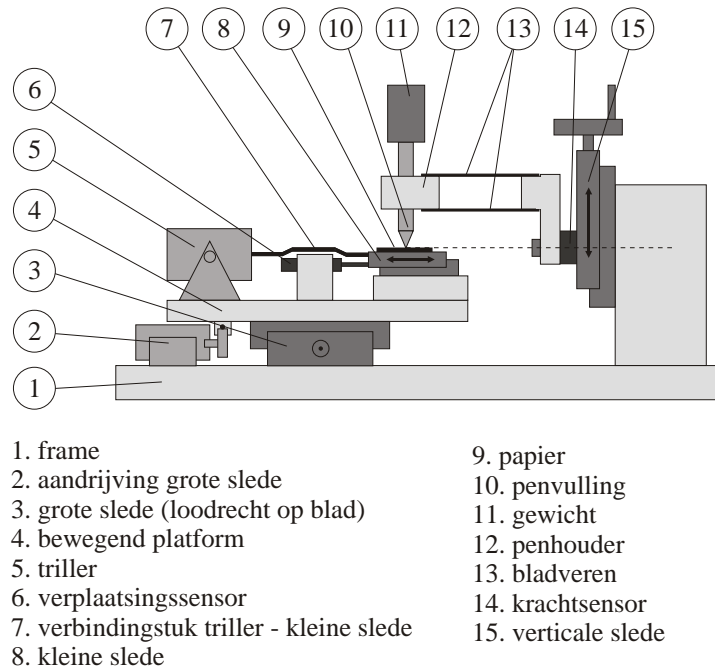
Naast deze algemene beschouwingen bestaat er een specifieke eis i.v.m. het opmeten van de wrijving van een penpunt: de penpunt mag nooit over een reeds beschreven oppervlak gaan. De aanwezigheid van de inkt en de indrukking van het papier zouden immers de wrijving beïnvloeden. Daarom wordt een tweede slede gebruikt, die loodrecht op de oscillerende hoofdbeweging een langzame translatiebeweging superponeert. Hierdoor wordt steeds nieuw papier aangevoerd en maakt de penpunt een sinus-vormige beweging op het papier.

### 5.2.2 Opbouw

Figuur 5.4 toont de schematische opbouw van de tribometer. Centraal staat de penpunt (10) en het papier (9). De penpunt is vastgemaakt in de penhouder (12), die via twee parallelle bladveren (13) met de krachtsensor (14) verbonden is. Hierbij ligt de krachtsensor in het verlengde van de te meten wrijvingskracht, zodat er geen moment op de krachtsensor optreedt. De krachtsensor hangt op zijn beurt vast aan de verticale slede (15). Met deze slede kan het geheel op en neer bewegen, zodat het papier eenvoudig te vervangen is. Het papier is vastgemaakt aan de kleine slede (8), die aangedreven wordt door een triller (5) met een slag van 4mm. Verder is een afstandsensor (6) voorzien die de beweging van de kleine slede meet. Deze afstandssensor ligt in het verlengde van de te meten beweging, zodat er geen Abbe-meetfout optreedt. De kleine slede, de triller en de afstandsensor zijn vastgemaakt aan het bewegend platform (4), dat op de grote slede (3) gemonteerd is. Deze grote slede zorgt voor een horizontale beweging loodrecht op de oscillerende hoofdbeweging, zodat de penpunt nooit over een reeds beschreven oppervlak schrijft. Een gelijkstroommotor (2) drijft de grote slede aan.

De twee parallelle bladveren tussen penhouder en krachtsensor introduceren een verticale translatievrijheidsgraad. Zonder deze vrijheidsgraad zou de krachtlus frame-papier-penpunt-frame vormgesloten zijn, waardoor de normaalkracht sterk afhangt van de toleranties van de opstelling. Door twee parallelle bladveren te gebruiken wordt de stijfheid in verticale richting verwaarloosbaar. De stijfheid in de overige richtingen blijft hoog zodat de wrijvingskracht naar de krachtsensor geleid wordt en de oriëntatie van de penhouder gegarandeerd is.

De hoogte van de verticale slede wordt ingesteld met behulp van een taster, die de verticale verplaatsing van de penhouder meet. Wanneer de penpunt het papier niet raakt, verandert het signaal van de taster als de slede daalt. Van zodra de penpunt



Figuur 5.4: Schematische opbouw van de tribometer.

het papier raakt, blijft het signaal constant. Bij de overgang tussen beide, wanneer de penpunt het papier net raakt, is de verticale kracht uitgeoefend door de parallelle bladveren gelijk aan het gewicht van de penhouder en de penpunt. Door vervolgens een bijkomend gewicht (11) bovenop de penhouder te plaatsen, zal de normaalkracht tussen penpunt en papier gelijk zijn aan dit bijkomend gewicht. Daar de stijfheid van de bladveren  $2\text{N/mm}$  bedraagt en de overgang tussen vrij bewegen of raken met een nauwkeurigheid van  $0.01\text{mm}$  vast te stellen is, bedraagt de fout op de normaalkracht maximaal  $0.02\text{N}$ .

### 5.3 Voorstudie

Deze voorstudie gaat de invloed van enkele parameters op de wrijving na. Deze parameters zijn het type penpunt, de papiersoort, de ondergrond, de kanteling van de pen, de normaalkracht en de frequentie van de oscillatie. Eerst wordt een referentie-experiment uitgevoerd met de standaardparameters uit tabel 5.1. Dit experiment resulteert in een referentie-wrijvingskarakteristiek, die het verband tussen de snelheid en de wrijvingscoëfficiënt - dit is de verhouding van de wrijvingskracht  $F_w$  tot de normaalkracht  $F_N$  - aangeeft. Vervolgens wordt telkens een experiment gedaan waarbij één parameter wijzigt, terwijl de overige parameters constant blijven. Deze testen

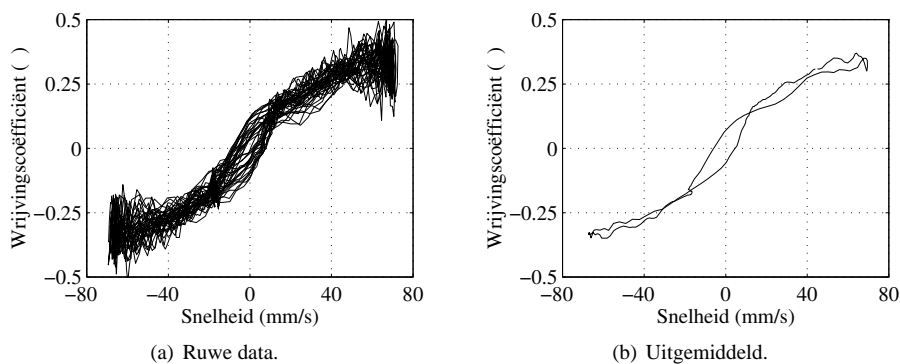
gebeurden in samenwerking met D. Verduyn [27].

Tabel 5.1: De standaardparameters voor het opstellen van de referentie-wrijvingskarakteristiek.

type penpunt	kogelpen (Bic® Crystal)
papiersoort	fotokopie-papier 80g/m <sup>2</sup>
ondergrond	harde ondergrond (aluminium)
helling pen	verticaal
normaalkracht	1N
frequentie	5Hz

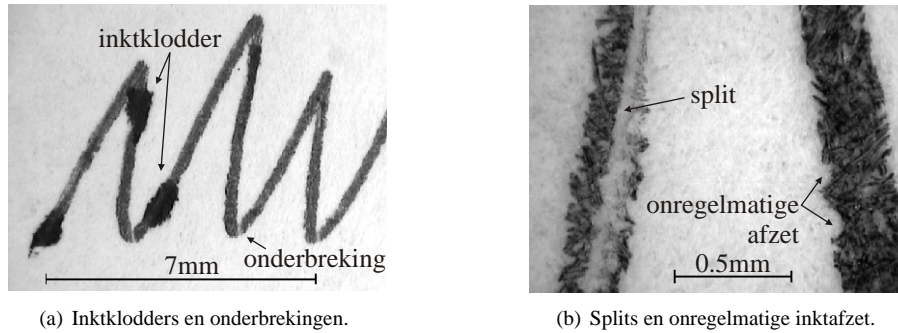
### 5.3.1 Referentie-wrijvingskarakteristiek

Figuur 5.5(a) toont de referentie-wrijvingskarakteristiek, opgemeten met de standaardparameters uit tabel 5.1. De meetdata van verschillende periodes vallen niet samen. De oorzaak van deze variërende wrijvingskracht ligt bij de onregelmatige inktafzet van de inktvulling. Figuur 5.6 toont een uitvergroting van een inktspoor van deze vulling. De onregelmatige inktafzet uit zich in inktklodders (overdadige inktafzet), splits (het inktspoor splitst zich op in twee sporen) of onderbrekingen in het inktspoor door het spinnen van de kogel rond een verticale as. Ook de ruwheid van het papier en de richting van de vezels in het papier dragen bij tot de variatie van de inktafzet.



Figuur 5.5: De referentie-wrijvingskarakteristiek.

Om de grafiek te verduidelijken en de spreiding te verminderen, wordt het gemiddelde over een groot aantal periodes genomen. Het resultaat is te zien in figuur 5.5(b). De wrijvingskracht stijgt monotoon met toenemende snelheid. Dit is een belangrijke eigenschap omdat hierdoor de snelheid bepaald kan worden vertrekkend vanuit een krachtmeting. Verder toont deze figuur aan dat de wrijving bij stijgende snelheid



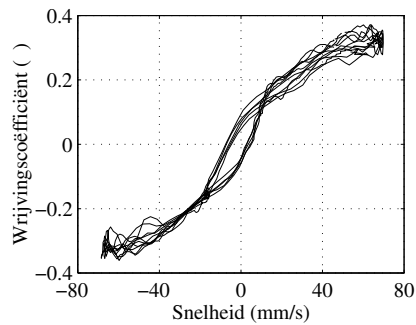
(a) Inktklodders en onderbrekingen.

(b) Splits en onregelmatige inktafzet.

Figuur 5.6: Onregelmatige inktafzet van de kogelpen.

verschilt van de wrijving bij dalende snelheid. Dit effect wordt veroorzaakt door de tijdsvertraging tussen snelheid en wrijvingskracht.

Het referentie-experiment wordt vijf keer herhaald om de repeteerbaarheid van de wrijvingsmeting te controleren. Figuur 5.7 toont het resultaat. De curves van de vijf experimenten vallen binnen een band van  $\pm 0.04N/N$  samen.



Figuur 5.7: Repeteerbaarheid van de wrijvingskarakteristiek.

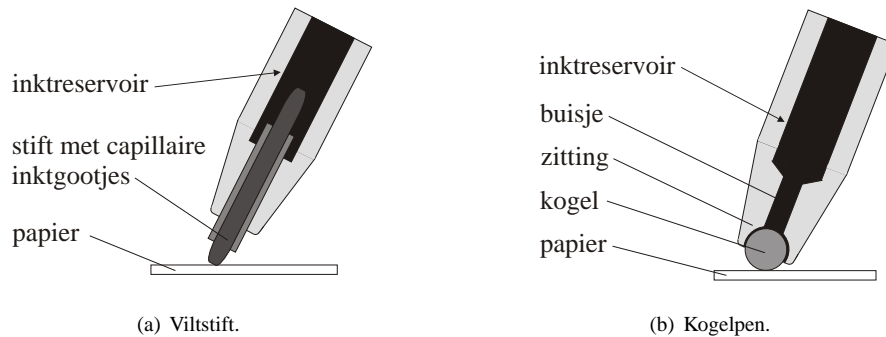
### 5.3.2 Parameterstudie

#### Invloed van het type inktvulling

Twee types van inktvullingen zijn bestudeerd: een viltstift en een kogelpen. Beide hebben een verschillend werkingsprincipe.

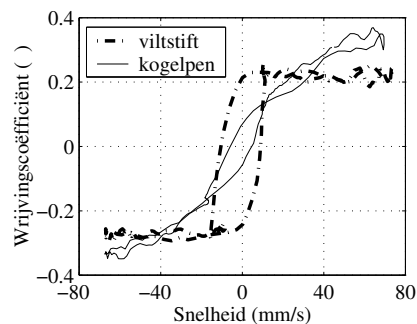
Figuur 5.8(a) toont het werkingsprincipe van een viltstift. De viltstift bevat kleine capillaire inktgootjes waarlangs de inkt van het reservoir naar het blad vloeit. Omdat de inkt door deze kleine inktgootjes zou vloeien, heeft hij een lage viscositeit. Hierdoor wordt de inkt gemakkelijk uit het contact penpunt-papier geperst. Bovendien wordt

dit type van inkt snel door het papier geabsorbeerd. Bijgevolg is de dikte van de vloeistoffilm beperkt en treedt er waarschijnlijk enkel grenslaagsmering op. Dit type van smering is in grote mate onafhankelijk van de snelheid.



Figuur 5.8: Werkingsprincipe.

Figuur 5.8(b) toont het werkingsprincipe van een kogelpen. Bij een kogelpen vloeit de inkt via een smal buisje naar de kogel, die de inkt over het papier uitrolt. Om te vermijden dat het inktreservoir leegloopt, heeft de inkt een hoge viscositeit. Bij een kogelpen treedt er op twee plaatsen tegelijk wrijving op, namelijk in het contact tussen kogel en papier en in het contact tussen kogel en zijn zitting. Hierbij is te verwachten dat de rollende wrijving tussen kogel en papier veel kleiner is dan de glijdende wrijving tussen kogel en zijn zitting. Daarnaast zorgt de hoge viscositeit van de inkt voor een dikkere vloeistoffilm, waardoor partiële of volledige vloeistofsmering mogelijk is. Beide types van wrijving zijn snelheidsafhankelijk.



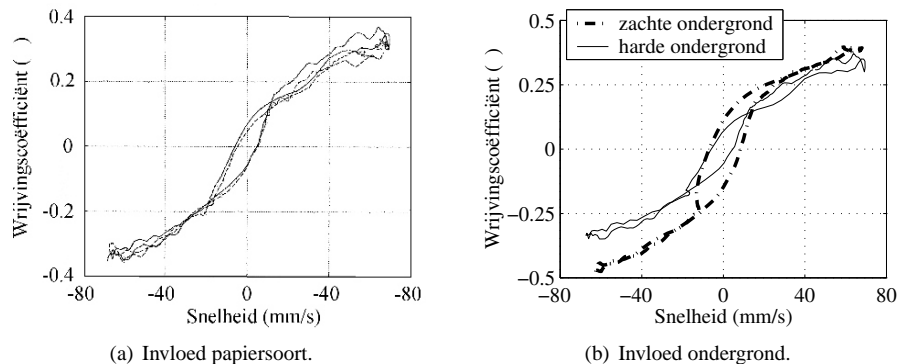
Figuur 5.9: Invloed van inktvulling op de wrijvingskarakteristiek.

Bovenstaande theoretische beschouwingen worden door de experimenten bevestigd. Figuur 5.9 toont de wrijvingskarakteristieken van een kogelpen (Bic<sup>®</sup> Crystal) en een viltstift (Schneider Topliner 967 04). De viltstift heeft een vlak verloop van

de wrijvingscoëfficiënt, wat duidt op grenslaagsmering. Hierdoor is dit type van inktvulling ongeschikt voor de computerpen. Het is immers onmogelijk om de snelheid te berekenen op basis van de gemeten wrijvingskracht. Bij een kogelpen daarentegen stijgt de wrijvingscoëfficiënt bij toenemende snelheid. Dit wijst op een volledige vloeistofsmering.

### Invloed van papier en ondergrond

Figuur 5.10(a) toont de wrijvingskarakteristieken bij twee verschillende papiersoorten: standaard fotokopie-papier ( $80\text{g/m}^2$ , dikte  $0.11\text{mm}$ , ruwheid  $R_a 3.2\mu\text{m}$ ) en papier van een post-it nootje (dikte  $0.095\text{mm}$ , ruwheid  $R_a 4.6\mu\text{m}$ ). Beide curves vallen binnen de repeeteerbaarheid van de wrijvingsmeting ( $\pm 0.04$ ) op elkaar. De invloed van de papiersoort is beperkt doordat de papiersoort enkel invloed uitoefent op de wrijving tussen kogel en papier. Deze rollende wrijving is echter kleiner dan de translerende wrijving tussen kogel en zijn zitting. Hierdoor wordt de totale wrijving nauwelijks beïnvloed.



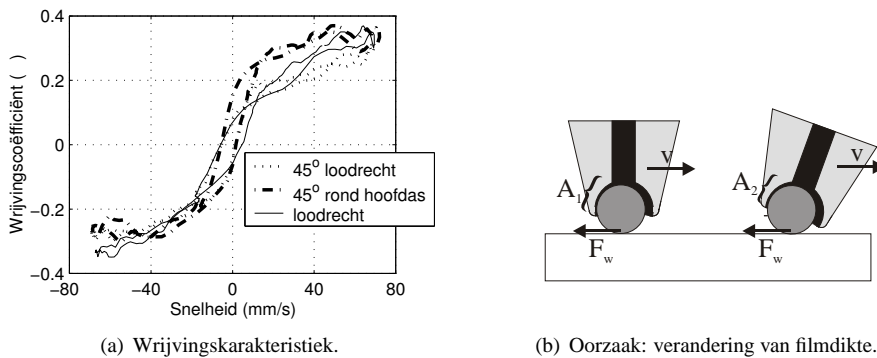
Figuur 5.10: Invloed papier en ondergrond op wrijvingskarakteristiek.

De hardheid van de ondergrond oefent wel een invloed uit op de wrijving. Figuur 5.10(b) toont de wrijvingskarakteristieken bij een harde (aluminium) en een zachte (kartonnen) ondergrond. De wrijving bij een zachte ondergrond is groter. De oorzaak ligt bij een stijging van de rolweerstand van de kogel door een toegenomen plastische vervorming van het papier. Deze plastische vervorming van het blad is duidelijk voelbaar wanneer op een zachte ondergrond geschreven wordt. Hierdoor wordt de rollende wrijving toch betekenisvol ten opzichte van de glijdende wrijving tussen kogel en zijn zitting. Merk op dat de hysteresis op de wrijvingskarakteristiek groter wordt bij een zachte ondergrond. Aangezien deze hysteresis een nauwkeurige berekening van de snelheid - vertrekkend vanuit een meting van de wrijvingskracht - bemoeilijkt, is het belangrijk dat de computerpen op een harde ondergrond schrijft.

### Kanteling van de pen

Zoals figuur 5.11(b) aantoont, zorgt een kanteling van de kogelpen voor een verandering in relatieve positie tussen de kogel en zijn zitting. Het oppervlak  $A_1$  vermindert immers tot het oppervlak  $A_2$ . Hierdoor verandert de drukbelasting en daarmee de dikte van de vloeistoffilms en de wrijvingskracht. Een theoretische berekening van dit effect op basis van de geometrie van de kogelpen en de viscositeit van de inkt valt buiten de scope van dit werk.

De invloed is wel experimenteel bepaald. Figuur 5.11(a) toont de invloed van de kanteling rond de hoofdbewegingsrichting en van een kanteling rond een as loodrecht op de hoofdbewegingsrichting. De kanteling rond de hoofdbewegingsrichting heeft een grotere invloed dan een kanteling loodrecht op de hoofdbewegingsrichting. Om dit effect in rekening te brengen moet dus niet alleen de kanteling van de pen beschouwd worden, maar ook de hoek tussen de rotatie-as en de schrijfrichting.



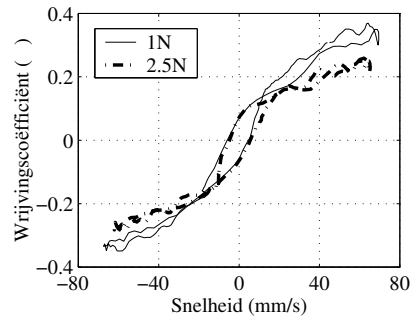
Figuur 5.11: Invloed kanteling van de kogelpen.

### Invloed van de normaalkracht

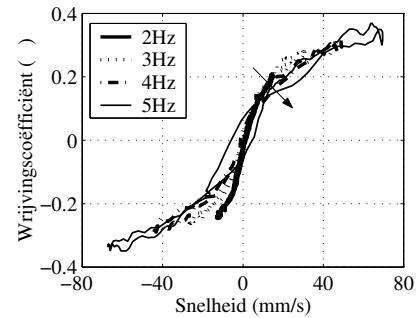
Figuur 5.12 toont de wrijvingskarakteristieken bij een normaalbelasting van 1N en 2.5N. De wrijvingscoëfficiënt neemt af bij toenemende belasting. Bij een snelheid van 60mm/s valt de wrijvingscoëfficiënt terug van 0.33 tot 0.25. De wrijvingscoëfficiënt verandert dus met de  $-1/3$  macht van de normaalkracht. De oorzaak ligt bij de veranderende drukopbouw in de vloeistoffilm. Bij gebrek aan gedetailleerde gegevens over de geometrie van de kogelpen is dit effect echter niet theoretisch berekenbaar.

### Invloed van de frequentie

Figuur 5.13 toont de invloed van de frequentie van de oscillatie. Bij stijgende frequentie draait de curve met de klok mee. Deze verandering komt door de dynamica van de wrijving [112]. Het frequentiebereik tijdens het schrijven is echter beperkt tot 20Hz,



Figuur 5.12: Invloed van de normaalkracht.



Figuur 5.13: Invloed van de frequentie.

zodat dit effect verwaarloosbaar is ten opzichte van de spreiding op de wrijvingskarakteristiek.

### 5.3.3 Besluit

Uit deze voorstudie kunnen de volgende besluiten getrokken worden:

- ▷ De inktvulling moet een kogelpen zijn. De wrijvingskarakteristiek van een viltstift is immers vlak, waardoor het onmogelijk is de snelheid via de gemeten wrijvingskracht te berekenen.
- ▷ De invloed van het papier is minder belangrijk, zodat de gebruiker hier de vrije keuze heeft.
- ▷ Een computerpen moet op een harde ondergrond schrijven, zodat de hysteresis in de wrijvingskarakteristiek tot een minimum beperkt wordt.
- ▷ De helling van een pen heeft een invloed op de wrijving. Hierbij is de richting van de kanteling ten opzichte van de schrijfrichting belangrijk.
- ▷ De wrijvingscoëfficiënt is afhankelijk van de normaalkracht tot de  $-1/3$  macht.
- ▷ De wrijvingskarakteristiek is afhankelijk van de frequentie van de beweging, maar deze invloed is kleiner dan de spreiding tussen verschillende periodes waardoor dit effect verwaarloosd kan worden.

## 5.4 Identificatie van het wrijvingsmodel

### 5.4.1 Wrijvingsmodel in één dimensie

In de literatuur bestaan verscheidene wrijvingsmodellen [112, 113, 114]. Deze wrijvingsmodellen simuleren onder andere het pre-glijdend gebied en de dynamiek van de wrijving zoals het stick-slip fenomeen en de tijdsvertraging tussen snelheid en wrijvingskracht. Het wrijvingsmodel voor een computerpen vereist deze graad van complexiteit niet. Om te beginnen is het pre-glijdend gebied irrelevant omwille van de kleine verplaatsingen (typisch  $1-10\mu\text{m}$ ). Ook de dynamiek van de wrijving wordt



in eerste instantie niet mee gemodelleerd. Er bestaan immers te veel externe factoren, die de wrijving beïnvloeden, zoals bijvoorbeeld de slijtage aan de kogel, de resterende hoeveelheid inkt, de luchtdruk en de omgevingstemperatuur. Hierdoor bestaat het gevaar dat een dynamisch model niet voldoende robuust zou zijn. Daarom is geopteerd voor een eenvoudig model  $v = f(\mu, F_N)$ , dat de snelheid  $v$  eenduidig berekent op basis van de wrijvingscoëfficiënt  $\mu$  en de normaalkracht  $F_N$ . Bovendien is het effect van de kanteling van de pen verwaarloosd voor de eenvoud van het model.

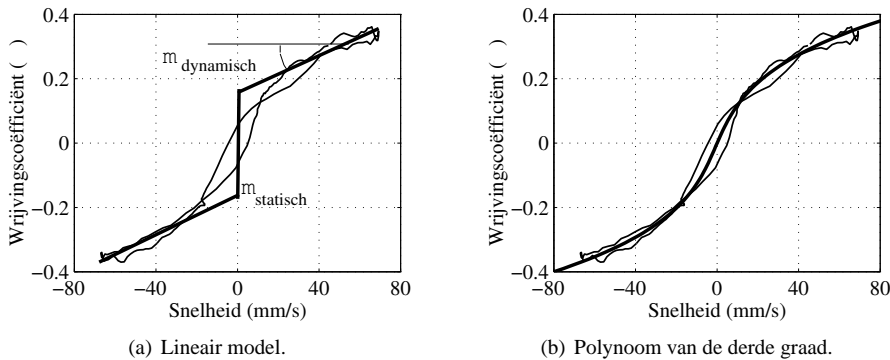
Het meest eenvoudige wrijvingsmodel gaat uit van een combinatie van een statische wrijvingscomponent en een viskeuze wrijvingscomponent, evenredig met de snelheid  $v$ , dus:

$$\frac{F_w}{F_z} = \mu_{\text{statisch}} \text{sign}(v) + \mu_{\text{dynamisch}} v, \quad (5.1)$$

met  $F_w$  de wrijvingskracht,  $F_z$  de normaalkracht,  $\mu_{\text{statisch}}$  de statische wrijvingscoëfficiënt en  $\mu_{\text{dynamisch}}$  de dynamische wrijvingscoëfficiënt. Herschreven naar de snelheid  $v$  geeft dit:

$$\begin{aligned} v &= \frac{1}{\mu_{\text{dynamisch}}} \left( \frac{F_w}{F_z} - \mu_{\text{statisch}} \right), \\ &= \frac{1}{\mu_{\text{dynamisch}}} (\mu_{\text{gemeten}} - \mu_{\text{statisch}}). \end{aligned} \quad (5.2)$$

Figuur 5.14(a) toont dit lineair model. Voor hoge snelheden komt het model overeen met de opgemeten wrijvingskarakteristiek bij standaardparameters. Bij lage snelheden is de afwijking echter groot.



Figuur 5.14: Wrijvingsmodellen.

Een beter model wordt bekomen door een polynoom van de derde graad te gebruiken voor de functie  $f(\mu, F_N)$ , met  $F_N$  gelijk aan 1N. De onbekende parameters van deze polynoom worden geschat door een kleinste kwadratenoptimalisatie met de opgemeten wrijvingskarakteristiek. Hierdoor wordt de volgende polynoom bekomen:

$$v = 900.918\mu^3 + 31.371\mu^2 + 68.703\mu + 0.039, \quad (5.3)$$

met  $v$  de snelheid uitgedrukt in mm/s en  $\mu$  de wrijvingscoëfficiënt. Figuur 5.14(b) geeft deze polynoom weer, samen met de opgemeten wrijvingskarakteristiek. Beide sluiten nauw aan bij elkaar. Het verhogen van de graad van de polynoom resulteert niet in een beter resultaat.

Merk op dat de coëfficiënten bij de termen in  $\mu^2$  en  $\mu^0$  verschillend zijn van nul, alhoewel deze coëfficiënten theoretisch gelijk aan nul zijn omwille van de symmetrie rond  $\mu = 0$ . Deze afwijking wordt veroorzaakt doordat de geïdentificeerde polynoom een benadering is van het theoretische verband.

Formule (5.3) is gebaseerd op metingen bij een normaalkracht van 1N. In de voorstudie is echter naar voor gekomen dat de normaalkracht een sterke invloed uitoefent op de wrijvingskarakteristiek. Daarom wordt de invloed van de normaalkracht mee in rekening gebracht door de opgemeten wrijvingscoëfficiënt te normeren volgens:

$$\mu_{norm} = \sqrt[3]{\frac{F_N}{F_{ref}}} \mu_{gemeten}, \quad (5.4)$$

met  $F_N$  de normaalkracht in Newton,  $F_{ref}$  gelijk aan 1N,  $\mu_{gemeten}$  de opgemeten wrijvingscoëfficiënt tijdens het schrijven en  $\mu_{norm}$  de input voor formule (5.3).

## 5.4.2 Wrijvingsmodel in twee dimensies

Het bovenstaande wrijvingsmodel is voor een één-dimensionale beweging opgesteld. Voor het reconstrueren van de tekst is echter een twee-dimensionaal model vereist, dat de snelheid in een vlak reconstrueert. Voor de uitbreiding van het wrijvingsmodel naar twee dimensies bestaan er twee alternatieven.

Het eerste alternatief is gebaseerd op de veronderstelling dat de wrijving in de x-richting niet beïnvloed wordt door de wrijving in de y-richting en omgekeerd. Het één-dimensionaal wrijvingsmodel mag dan op elke as apart toegepast worden, dus:

$$\begin{aligned} v_x &= f\left(\frac{F_{w,x}}{F_N}, F_N\right) \\ v_y &= f\left(\frac{F_{w,y}}{F_N}, F_N\right) \end{aligned}$$

met  $v_x$  en  $v_y$  de snelheid in x- en y-richting,  $F_{w,x}$  en  $F_{w,y}$  de wrijvingskracht in de x- en y-richting en  $F_N$  de normaalkracht.

Het tweede alternatief past het één-dimensionaal wrijvingsmodel toe op de raaklijn aan de beweging. De formules zijn dan:

$$\begin{aligned} F_w &= \sqrt{F_{w,x}^2 + F_{w,y}^2}, \\ v &= f\left(\frac{F_w}{F_N}, F_N\right), \\ v_x &= v \frac{F_{w,x}}{F_w}, \\ v_y &= v \frac{F_{w,y}}{F_w}, \end{aligned}$$

met  $v$  de totale snelheid in het vlak van het papier,  $v_x$  en  $v_y$  de snelheid in x- en y-richting,  $F_{w,x}$  en  $F_{w,y}$  de wrijvingskracht in de x- en y-richting,  $F_w$  de totale wrijvingskracht en  $F_N$  de normaalkracht.

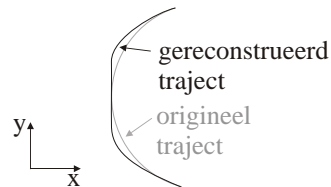
Het tweede wrijvingsmodel is gekozen omwille van een aantal redenen:

- Het eerste twee-dimensionale model zondigt tegen de definitie van de wrijvingskracht, namelijk dat de wrijvingskracht tegenovergesteld aan de beweging is. Figuur 5.15(a) toont het alternatief met een wrijvingsmodel voor elke as apart. Doordat de x- en y-component van de snelheid apart berekend worden, bestaat er geen garantie dat de totale snelheid in tegengestelde richting van de totale wrijvingskracht ligt. Het wrijvingsmodel voor één richting is immers niet lineair. Het tweede twee-dimensionale model, getoond in figuur 5.15(b), biedt deze garantie wel.



Figuur 5.15: Wrijvingsmodellen in een vlak.

- Het eerste twee-dimensionale model heeft problemen bij de reconstructie van een cirkelboog die raakt aan één van de assen (figuur 5.16). In die situatie zal de wrijvingskracht in de richting loodrecht op de as klein worden. Met twee aparte lineaire modellen wordt de snelheid in die richting dan nul, waardoor de cirkelboog afgevlakt wordt. Bij het polynoom-model is dit effect minder uitgesproken, maar toch gaat de cirkelboog afgevlakt worden door de niet-lineaire functie  $f(\mu, F_N)$ . Het andere twee-dimensionale model werkt in een raakvlak aan de beweging, waardoor dit fenomeen niet kan optreden.



Figuur 5.16: Afvlakking van cirkelboog als elke as een apart wrijvingsmodel heeft.

- Het eerste twee-dimensionale model heeft een hogere gevoeligheid voor offset-fouten. Stel dat  $v_x$  of  $v_y$  een offset vertoont. Volgens Bijlage C.3.2 geeft deze systematische fout na integratie een lineair toenemende fout in de tijd volgens

$\sum \Delta v \Delta t$ , met  $\Delta t$  de tijd,  $\Delta v$  de offset op de snelheid. Als in het tweede model de totale snelheid dezelfde offset vertoont, zal de fout op de x-positie gelijk zijn aan  $\sum \frac{F_{w,x}}{F_w} \Delta v \Delta t$ . Aangezien  $F_{w,x}$  van teken verandert als men terug beweegt, is deze foutgevoeligheid kleiner. Eenzelfde redenering kan gemaakt worden voor de y-positie.

Een simulatie van beide modellen bevestigt deze theoretische afleiding. Als traject van de penpunt is gekozen voor een opeenvolging van lussen. Beschouw eerst de resultaten van het tweede model, getoond in figuren 5.17(c) en 5.17(d). Een offset van  $5^\circ$  op de hoek - dit is de verhouding van  $F_{w,x}$  op  $F_w$  - zorgt enkel voor een rotatie van de hele grafiek. De vorm en verhoudingen blijven echter behouden, zodat de originele figuur gemakkelijk herkenbaar is. Ook een offset van 50% op de snelheid geeft een herkenbaar resultaat, al worden niet alle verhoudingen gerespecteerd. De totale fout blijft beperkt omdat een deel van de fout - opgestapeld tijdens de beweging van links naar rechts - gecompenseerd wordt tijdens de beweging van rechts naar links. Het eerste model heeft deze robuustheid niet. Figuren 5.17(a) en 5.17(b) tonen het resultaat bij een even grote offset op de snelheid  $v_x$  of  $v_y$ . Wanneer de penpunt van links naar rechts beweegt, zorgt de positieve offset op de snelheid voor een grotere afgelegde weg. Wanneer de penpunt van rechts naar links beweegt, zorgt de offset ervoor dat de gereconstrueerde snelheid positief is. In het reconstrueerde traject beweegt de penpunt dus naar rechts, waardoor de originele vorm van het traject totaal verandert.

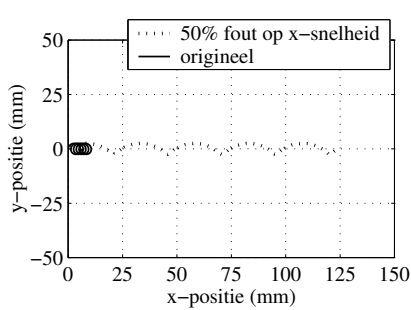
- Bij het tweede model is het effect van de tijdsvertraging minder belangrijk. De totale snelheid ligt immers steeds hoger dan de snelheid in x- en y-richting, waardoor de hysteresislus bij lage snelheden minder doorlopen wordt.

### 5.4.3 Samenvatting

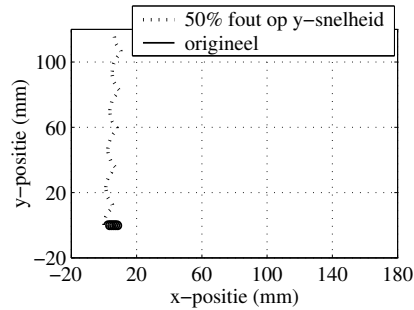
Het gekozen wrijvingsmodel berekent de totale snelheid  $v$  in het vlak van het papier met een derde-gradspolynoom in de genormaliseerde wrijvingscoëfficiënt  $\mu_{norm}$ . Deze genormaliseerde wrijvingscoëfficiënt houdt rekening met de normaalkracht  $F_N$  en de opgemeten wrijvingscoëfficiënt  $\mu_{gemeten}$ . Om de snelheidscomponenten  $v_x$  en  $v_y$  te bekomen, wordt de totale snelheid  $v$  op de x- en y-richting projecteerd. Hierbij wordt de snelheid in de tegengestelde richting van de wrijvingskracht verondersteld. Dit resulteert in de volgende formules:

$$\begin{aligned}
 F_w &= \sqrt{F_{w,x}^2 + F_{w,y}^2}, \\
 \mu_{gemeten} &= \frac{F_w}{F_N}, \\
 \mu_{norm} &= \sqrt[3]{\frac{F_N}{1N} \mu_{gemeten}} \\
 v &= 900.918 \mu_{norm}^3 + 31.371 \mu_{norm}^2 + 68.703 \mu_{norm} + 0.039, \\
 v_x &= v \frac{F_{w,x}}{F_w}, \\
 v_y &= v \frac{F_{w,y}}{F_w},
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

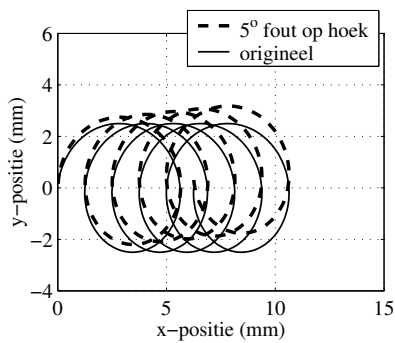
met  $F_{w,x}$ ,  $F_{w,y}$  de x- en y-component van de wrijvingskracht,  $F_w$  de totale wrijvingskracht,  $\mu_{gemeten}$  de opgemeten wrijvingscoëfficiënt,  $\mu_{norm}$  de genormaliseerde



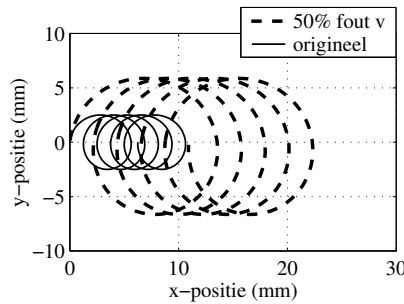
(a) Model 1: offset op snelheid in x-richting.



(b) Model 1: offset op snelheid in y-richting.



(c) Model 2: offset op hoek.



(d) Model 2: offset op de totale snelheid.

Figuur 5.17: Simulatie van een offset bij beide modellen.

wrijvingscoëfficiënt,  $v$  de totale snelheid en  $v_x, v_y$  de x- en y-component van de snelheid.

## 5.5 Validatie van het wrijvingsmodel

### 5.5.1 Beschrijving van de experimenten

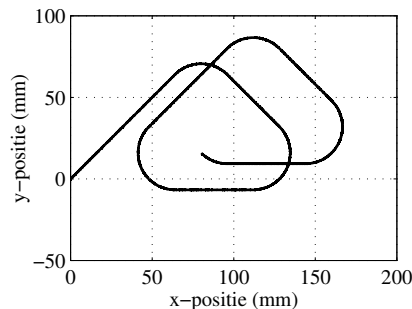
Het wrijvingsmodel wordt gevalideerd door enkele schrijfproeven uit te voeren. Opdat deze schrijfproeven een hoge repeteerbaarheid zouden hebben, worden ze niet met de hand uitgevoerd, maar met een xy-plotter. De kogelpen wordt daartoe via een drie-assige piëzo-kraftsensor (9251A van Kistler) verticaal vastgemaakt aan de xy-plotter. De kraftsensor meet zowel de normaalkraft als de wrijvingskraft op de penpunt. Aangezien de piëzo-kraftsensor geen DC meet, wordt de DC-waarde van de normaalkraft geschat op basis van het gewicht van de onderdelen (2.3N). De opgemeten krachten dienen als ingang voor het wrijvingsmodel, dat de snelheid berekent. Enkelvoudige integratie van de snelheid levert vervolgens het gereconstrueerde

traject op, dat vergeleken wordt met het stuursignaal naar de  $xy$ -plotter. Uit metingen blijkt dat de fout tussen de werkelijke positie van de penpunt en het stuursignaal verwaarloosbaar is op voorwaarde dat het traject geen discontinuïteiten in de eerste afgeleide bevat.

Met de verificatie-opstelling worden zes experimenten gedaan. Tijdens ieder experiment wordt hetzelfde traject afgelegd, maar telkens met een andere constante snelheid. Deze zes snelheden zijn gelijk verdeeld over het hele snelheidsbereik, zodat heel het model gecontroleerd wordt. Aan het traject zijn enkele eisen gesteld:

- Het traject moet een grote amplitude hebben. Op die manier kan gecontroleerd worden of de slag (4mm) van de tribometer uit paragraaf 5.2 representatief is voor de wrijving bij grotere afstanden.
- Het traject moet twee-dimensionaal zijn zodat de uitbreiding naar twee dimensies gecontroleerd kan worden.
- Het traject moet eenvoudig te programmeren zijn. Daarom bestaat het traject uit een combinatie van lijnen en cirkelbogen.
- Het traject mag geen discontinuïteiten in de eerste afgeleide bevatten omdat de  $xy$ -plotter een beperkte dynamica heeft.

Het traject getoond in figuur 5.18 voldoet aan deze eisen. Het bestaat uit een opeenvolging van lijnen en cirkelbogen. Hierbij is er zowel een cirkelboog die raakt aan de  $x$ -as als aan de  $y$ -as, zodat het probleem van het afvlakken van de cirkelbogen bestudeerd kan worden. Bovendien bevat het traject drie paar evenwijdige lijnen en één paar loodrecht op elkaar staande lijnen, zodat de reconstructie van de vorm geverifieerd kan worden.

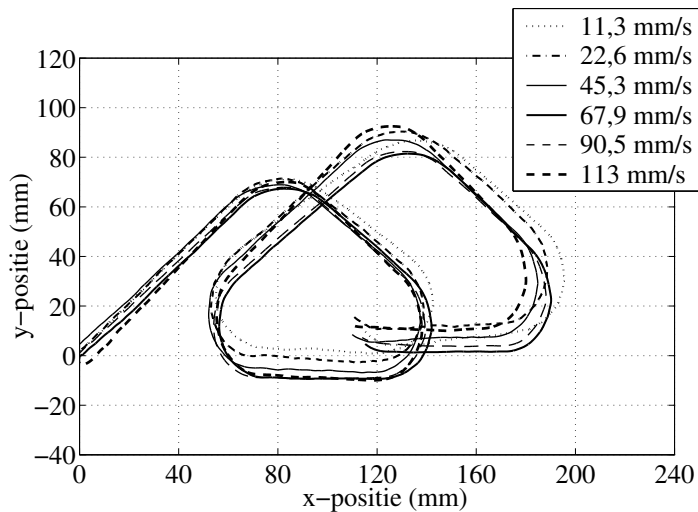


Figuur 5.18: Het opgelegde traject.

### 5.5.2 Bespreking van de experimenten

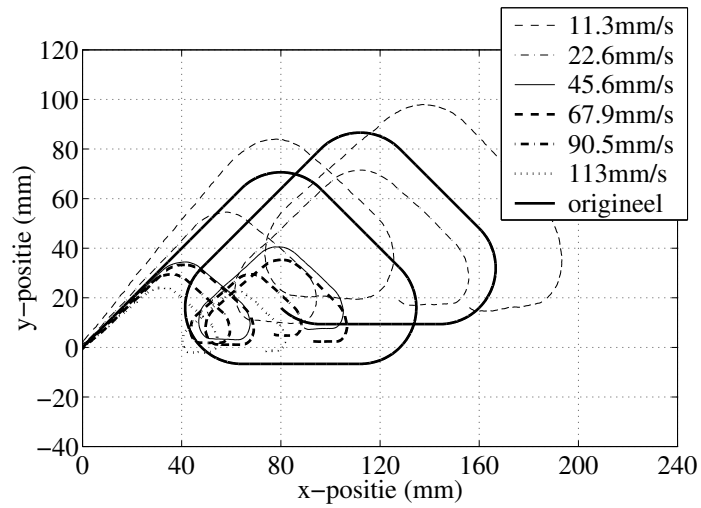
De zes validatie-experimenten worden gebruikt om het wrijvingsmodel in twee fasen te valideren. In een eerste fase wordt enkel de berekende richting van de snelheid gevalideerd. Deze richting is belangrijk voor de vorm van het afgelegde traject. In een tweede fase wordt het volledige wrijvingsmodel, met de richting en de grootte van de snelheid gevalideerd.

Figuur 5.19 toont het resultaat van de validatie van de gereconstrueerde vorm. Bij deze reconstructies is de richting van de snelheid bepaald aan de hand van de krachtmeting, terwijl de grootte van de snelheid gelijkgesteld is aan de opgelegde snelheid. De vorm wordt goed gereconstrueerd: evenwijdige lijnen blijven evenwijdig, loodrechtelijkheid wordt behouden en de bogen blijven cirkels. Het model is dus in staat om de vorm van een tekst te reconstrueren. De kleine afwijkingen tussen de verschillende curves worden onder andere veroorzaakt door kleine meetfouten op de krachtmeting en verschillen tussen de werkelijke snelheid en de theoretische snelheid die bij de reconstructie gebruikt is.



Figuur 5.19: Controle van de vorm.

Vervolgens worden de zes trajecten gereconstrueerd met behulp van zowel de richting als de grootte van de snelheid voorspeld door het wrijvingsmodel. Het resultaat staat in figuur 5.20. De verschillende curves vallen niet meer op elkaar. Vooral voor de curves met een hoge snelheid wordt de snelheid onderschat. De vorm van het traject is echter herkenbaar en de drift blijft beperkt. Hieruit blijkt de robuustheid van het gekozen wrijvingsmodel in twee dimensies. In het volgende hoofdstuk zullen reële schrijftesten met tekst uitgevoerd worden.



Figuur 5.20: Controle van de grootte.

## 5.6 Besluit

Het wrijvingsmodel, dat de wrijvingskracht omzet naar de snelheid van de penpunt, vormt een essentieel onderdeel van een schrijvende computerpen. Aangezien de huidige stand van de tribologie geen theoretische berekening van deze wrijving toelaat, is het wrijvingsmodel experimenteel geïdentificeerd.

Voor het opmeten van het snelheid-wrijvingsverband tussen penpunt en papier, is een speciale tribometer ontworpen. De tribometer legt een lineair periodische beweging op aan het papier, terwijl de penpunt vastgehouden wordt. De wrijvingskracht tussen beide wordt gemeten met behulp van een krachtsensor vastgemaakt aan de penpunt. Speciaal aan deze tribometer is een bijkomende slede, die een beweging loodrecht op de oscillatie superponeert. Deze slede is nodig opdat de penpunt nooit twee keer over hetzelfde oppervlak zou gaan.

Met de tribometer is eerst een voorstudie gedaan, die de kwalitatieve invloed van enkele parameters op de wrijving nagaat.

- ▷ De inktvulling moet een kogelpen zijn. De wrijvingskarakteristiek van een viltstift is immers vlak, waardoor het onmogelijk is de snelheid via de gemeten wrijvingskracht te berekenen.
- ▷ De invloed van het papier is minder belangrijk, zodat de gebruiker hier de vrije keuze heeft.
- ▷ Een computerpen moet op een harde ondergrond schrijven, zodat de hysteresis in de wrijvingskarakteristiek tot een minimum beperkt wordt.
- ▷ De helling van een pen heeft een invloed op de wrijving.
- ▷ De wrijvingscoëfficiënt is afhankelijk van de normaalkracht tot de  $-1/3$  macht.
- ▷ De wrijvingskarakteristiek is afhankelijk van de frequentie van de beweging,



maar deze invloed is kleiner dan de spreiding tussen verschillende periodes.

Vervolgens is het wrijvingsmodel opgesteld. Het model bestaat uit een derdegraadspolynoom  $v=f(\mu_{norm})$ , die gefit wordt door de experimentele data bij standaardparameters. Deze polynoom berekent het verband tussen de genormeerde wrijvingscoëfficiënt  $\mu_{norm}$  en de totale snelheid  $v$ . Hierbij wordt  $\mu_{norm}$  bepaald uit de totale wrijvingskracht en de normaalkracht. Voor de uitbreiding van dit model naar twee dimensies, is geopteerd voor het toepassen van dit model in het raakvlak aan de beweging. Deze benadering geeft een substantiële vermindering van de foutenophoping door een offset op het wrijvingsmodel.

Tot slot is een validatie-opstelling gebouwd die het schrijven simuleert. Hiervoor is de kogelpen via een drie-assige krachtsensor vastgemaakt aan een xy-plotter. Testen met deze opstelling tonen aan dat het wrijvingsmodel de richting en de vorm van het traject nauwkeurig reconstrueert. Alhoewel de absolute grootte van de snelheid minder nauwkeurig geschat wordt, blijft de vorm herkenbaar. Hieruit blijkt de robuustheid van het ontwikkelde wrijvingsmodel. In het volgende hoofdstuk zullen schrijf-experimenten met een prototype van de pen aantonen dat dit volstaat om geschreven tekst herkenbaar te reconstrueren.



## Hoofdstuk 6

# Schrijvende computerpen

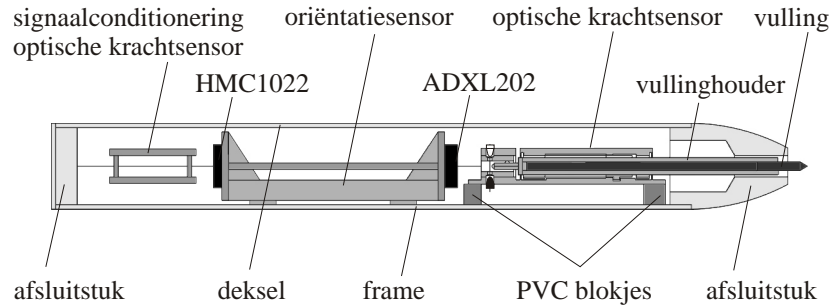
*In de voorbije hoofdstukken zijn verschillende componenten van een schrijvende computerpen in een niet-gestructureerde omgeving afzonderlijk bestudeerd. Een oriëntatiesensor en een krachtsensor werden ontwikkeld en de wrijving tussen penpunt en papier werd geïdentificeerd. In dit hoofdstuk worden deze drie componenten tot één geheel geïntegreerd. Paragraaf 6.1 gaat dieper in op de bouw van een prototype, waarbij de ontwikkelde sensoren in een behuizing geïntegreerd worden. Vervolgens bespreekt paragraaf 6.2 de software voor het reconstrueren van een eenvoudig schrift. Aansluitend toont paragraaf 6.3 door middel van schrijffesten het potentieel en de beperkingen van dit prototype aan.*

### 6.1 Ontwikkelen van het prototype

Het prototype moet de mogelijkheden en de beperkingen van een schrijvende computerpen in een niet-gestructureerde omgeving aantonen. In deze omgeving is met het beperkte budget en de huidige stand van de techniek enkel een schrijffase mogelijk (Zie paragraaf 3.2.5). Bijgevolg is er in dit prototype geen luchtfase geïmplementeerd.

Bij dit prototype ligt de nadruk op de ontwikkelde sensoren en het wrijvingsmodel en niet op de miniaturisatie van de elektronica. Daarom werd een deel van de elektronica niet in de pen geïntegreerd. Met name de digitalisering van de signalen gebeurt extern met behulp van een PC-meetkaart (National Instruments AT-MIO-16XE-50). De elektronica in de pen beperkt zich dus tot de signaalconditionering van de sensoren. Om deze schakeling - opgebouwd uit commercieel verkrijgbare discrete componenten - in de pen te kunnen integreren, bedraagt de binnendiameter van de penbehuizing 18mm. Bovendien is de lengte van de pen om dezelfde reden vergroot tot 215mm. Deze afmetingen wijken af van de specificaties in hoofdstuk 2 ( $\phi 12\text{mm} \times 165\text{mm}$ ). De ontwikkelde sensoren voldoen echter wel aan de deze specificatie.

Figuur 6.1 toont een schematische voorstelling van het prototype. Het prototype heeft de vorm van een cilinder met een buitendiameter 20mm, een wanddikte van 1mm en lengte 215mm. Aan de kant van de inktvulling is een afschuining voorzien zodat de penpunt tijdens het schrijven steeds zichtbaar is. Om een goede bereikbaarheid van alle sensoren te garanderen, bestaat de behuizing uit twee helften. Beide helften

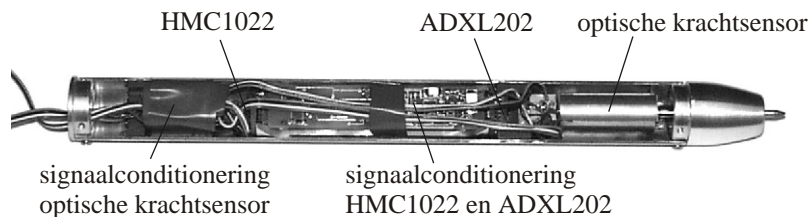


Figuur 6.1: Het schema van het prototype.

worden tegen elkaar geschroefd met behulp van twee afsluitstukken. De onderste helft van de behuizing dient als frame voor de bevestiging van alle sensoren, terwijl de bovenste helft enkel als deksel dient. Hierbij is de stijfheid van het geheel voldoende hoog om een nauwkeurige positionering van alle sensoren te garanderen.

Aan het rechter uiteinde van het frame is de krachtsensor gemonteerd op twee PVC blokjes, vastgelijmd aan het frame. Deze PVC blokjes zorgen voor een thermische isolatie van de krachtsensor ten opzichte van de behuizing, zodat de warmte van de hand slechts langzaam de krachtsensor bereikt. Achter de krachtsensor zit de oriëntatiesensor, bestaande uit de accelerometer ADXL202 en de magnetische sensor HMC1022. Hierbij bevindt de ADXL202 zich op 85mm van de penpunt, zodat de invloed van de versnelling van de pen op de oriëntatiemeting minimaal is. Omwille van plaatsgebrek tussen de HMC1022 en de ADXL202 is de signaalconditionering van de krachtsensor boven de HMC1022 geplaatst. Figuur 6.2 toont een foto van het geassembleerde prototype. De gebruikte inktvulling is een kogelpen (Rotring DIN16554), die 7mm uit de pen steekt.

Merk op dat er geen rekening gehouden is met de specificaties over kostprijs en ligging van het zwaartepunt (Zie hoofdstuk 2). Voor een prototype van de eerste generatie zijn deze specificaties niet relevant. De uiteindelijke behuizing bestaat immers uit een spuitgegoten stuk, waardoor de kostprijs en de gewichtsverdeling nog sterk



Figuur 6.2: Het prototype (zonder deksel,  $\phi 20\text{mm} \times 222\text{mm}$ ).

veranderen.

## 6.2 Ontwikkelen van de software

De software voor het prototype bestaat uit twee delen. Het eerste deel verzorgt de data-acquisitie, terwijl het tweede deel het schrift reconstrueert.

Voor de data-acquisitie wordt een Labview-programma gebruikt. Deze software wordt door National Instruments bij de PC-meetkaart (National Instruments AT-MIO-16XE-50) meegeleverd. Het programma meet alle kanalen met een bemonsteringsfrequentie van 1000Hz en schrijft de meetdata weg in een bestand.

Het reconstrueren van de pennentrek gebeurt door een Matlab-programma. De volledige programma is beschikbaar in Bijlage G. Dit programma leest het bestand met de meetdata en berekent het twee dimensionale beeld van de geschreven tekst in verschillende stappen:

1. Inlezen van het bestand met de meetdata.
2. Filteren van de signalen.
3. Berekenen van de azimuthhoek  $\varphi$ , de elevatiehoek  $\theta$  en de spinhoek  $\psi$  uit de signalen van de accelerometer ADXL202 en de magnetische sensor HMC1022.
4. Compenseren van het gewicht van de vulling en de vullinghouder in de signalen van de krachtsensor.
5. Compenseren van de drift op de signalen van de krachtsensor.
6. Berekenen van de krachten uit de signalen van de krachtsensor.
7. Transformeren van de krachten naar het vast assenstelsel.
8. Berekenen van de snelheid van de penpunt uit de opgemeten krachten met behulp van het wrijvingsmodel.
9. Integreren van de snelheid met de achterwaartse rechthoekregel. De keuze van de achterwaartse rechthoekregel is artificieel omdat er door de kleine tijdstap (1ms) geen verschil bestaat met de andere integratieregels (voorwaartse rechthoekregel en trapeziumregel).
10. Visualiseren van de pennentrek.

Stappen 1, 7, 9 en 10 zijn triviaal. Stappen 3, 6 en 8 zijn respectievelijk in hoofdstukken 3, 4 en 5 behandeld. De overblijvende stappen 2, 4 en 5 worden hieronder verduidelijkt.

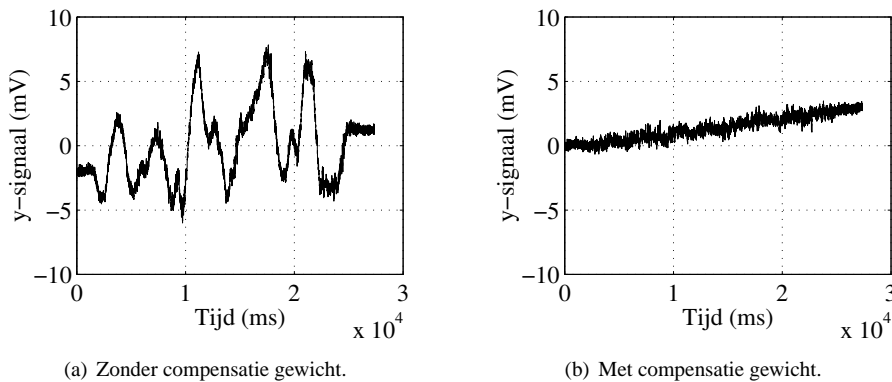
### Stap 2: Filteren van de signalen

Figuur 6.3(a) toont het y-signaal van de krachtsensor tijdens het schrijven. Bij de minima en maxima van het signaal treedt een hoogfrequente storing (312Hz) op. Deze storing wordt veroorzaakt door de excitatie van de resonantiefrequentie van de krachtsensor (Zie paragraaf 4.4.5). Aangezien deze frequentie 15 keer hoger ligt dan de hoogste te meten frequentie (20Hz), kan de storing onderdrukt worden door een digitale filter. Hiervoor is een laagdoorlaatfilter (Butterworth, 4e orde, 200Hz) geïmplementeerd. De breekfrequentie van deze filter ligt 10 keer hoger dan de hoogst te meten frequentie. Hierdoor zal deze filter een verwaarloosbare invloed uitoefenen op de te meten frequentieband (0..20Hz). Figuur 6.3(b) toont het resultaat na filteren. De storing is



gen met een beperkt inktreservoir (bijvoorbeeld 1 gram) te gebruiken, zodat dit effect verwaarloosbaar is.

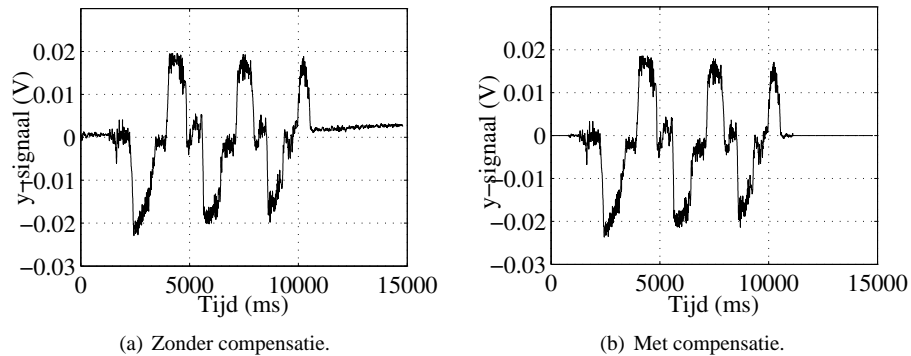
Om de compensatie van het gewicht te verifiëren wordt een test gedaan, waarbij de pen traag in de lucht beweegt. De contactkrachten op de penpunt zijn dan onbestaand en de inertiële krachten op de massa van de vulling en vullinghouder zijn verwaarloosbaar. De krachtsensor meet dus enkel de invloed van het gewicht. Figuur 6.5(a) toont het y-sigitaal van de krachtsensor, waarbij de invloed van het gewicht duidelijk zichtbaar is. Figuur 6.5(b) toont hetzelfde signaal na eliminatie van het gewicht. De invloed van het gewicht is volledig verdwenen. Het signaal vertoont enkel een drift (0.1mV/s) ten gevolge van de thermische opwarming van de sensor. Deze drift wordt in stap 5 behandeld.



Figuur 6.5: Het y-sigitaal van de krachtsensor bij een langzame beweging in de lucht.

### Stap 5: Compenseren van de drift

Tijdens het schrijven warmt de pen - en dus de krachtsensor - op door de lichaamswarmte van de hand. Aangezien de optische krachtsensor temperatuursgevoelig is - zie figuur 4.38(a) - driften de signalen van de krachtsensor tijdens het schrijven weg. Deze drift kan gecompenseerd worden door een bijkomende temperatuursensor. Een andere en goedkopere oplossing is de software-matige compensatie van de drift door gebruik te maken van een eigenschap van het schrijfproces, namelijk het afwisselend contact van de penpunt met het papier. Wanneer de penpunt geen contact maakt, meet de krachtsensor enkel de drift van het signaal, het gewicht van de vulling en vullinghouder en de inertiële kracht op deze massa. Het invloed van het gewicht is in stap 4 geëlimineerd en de inertiële kracht op deze massa is klein. Bijgevolg is de drift voor en na elke pennentrek gekend. De drift tijdens het maken van een pennentrek wordt daarom geschat op basis van een rechte door de drift voor en na de pennentrek. Deze schatting van de drift wordt afgetrokken van het signaal tijdens het maken van de pennentrek. Figuur 6.6 toont het resultaat voor en na compensatie. De drift is volledig gecompenseerd.



Figuur 6.6: De compensatie van de drift op het y-signaal van de krachtsensor.

### 6.3 Schrijftesten

Bij de doelstelling van het doctoraat in hoofdstuk 1 zijn vier niveaus van autonomie vooropgesteld. Op het eerste niveau worden enkel losse letters van het Graffiti alfabet gereconstrueerd. Op het tweede niveau worden woorden in een natuurlijk handschrift gereconstrueerd, die met één enkele pennentrek gemaakt zijn. Het derde niveau bevat naast het reconstrueren van een pennentrek ook een beperkte luchtfase zodat woorden bestaande uit meerdere pennentrekken gereconstrueerd kunnen worden. Het vierde en hoogste niveau van autonomie is het reconstrueren van een hele tekst. Zoals hoofdstuk 3 aantoont, is een beperkte luchtfase in een niet-gestructureerde omgeving en binnen de budgettaire ruimte niet mogelijk. Hierdoor kan het derde en vierde niveau niet gerealiseerd worden en zijn de mogelijkheden van het prototype enkel voor de eerste twee niveaus getest.

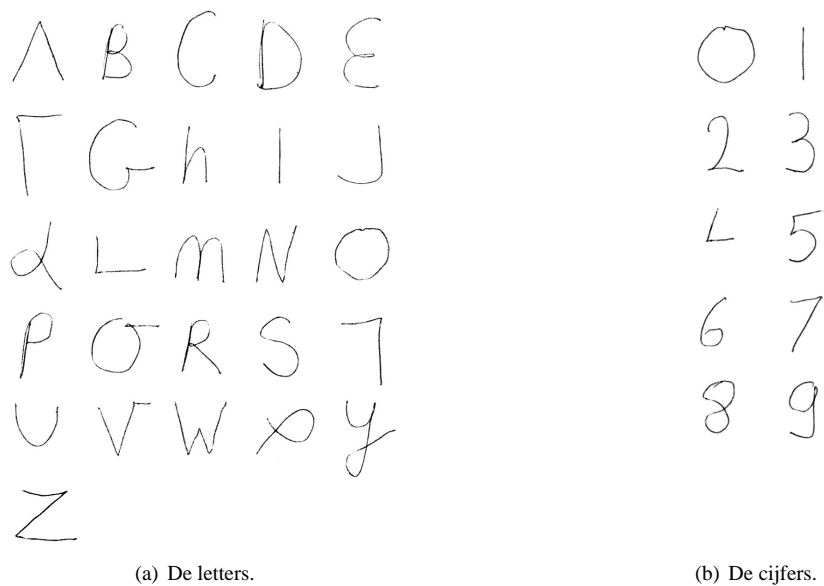
#### 6.3.1 Schrijven van het Graffiti alfabet

Het Graffiti handschrift bestaat uit een set van letters en cijfers, die met één enkele pennentrek geschreven zijn. Voor het omzetten van deze pennentrek naar de overeenkomstige ascii-tekens, wordt een onderscheid tussen de 26 letters en de 10 cijfers gemaakt op basis van:

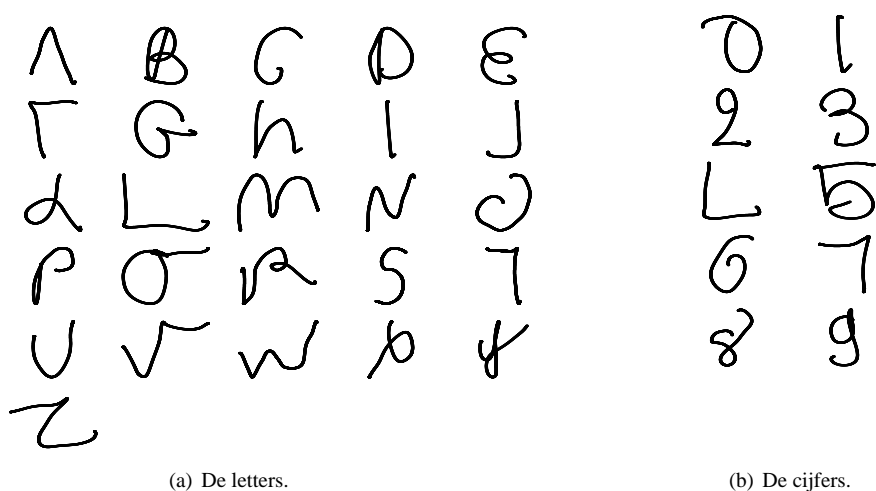
- een expliciete cijfer- of lettermode, waardoor bijvoorbeeld de letter O van het cijfer 0 onderscheiden wordt,
- de vorm of het beeld van een pennentrek,
- het beginpunt van een pennentrek,
- de manier waarop een pennentrek gemaakt is, dus met andere woorden de beweging van de penpunt.



Door het beperkt aantal mogelijkheden (26 letters of 10 cijfers) voor het omzetten van een pennentrek, is een nauwkeurige reconstructie van de pennentrek minder belangrijk.



Figuur 6.7: Origineel geschreven en ingescande letters en cijfers in het Graffiti handschrift.



Figuur 6.8: Reconstructie van de letters en cijfers in het Graffiti handschrift.

Figuur 6.7 toont de origineel geschreven en ingescande letters en cijfers in het Graffiti handschrift. De reconstructie van deze letters en cijfers zijn getoond in figuur 6.8. Elke gereconstrueerde letter en cijfer is naar een uniforme grootte geschaald, zodat een goede leesbaarheid bekomen wordt.

Afwijkingen tussen de gereconstrueerde en de origineel geschreven letter zijn onder andere:

- het niet sluiten van een pennentrek (de letter O en de cijfers 0 en 8),
- het vervormen van een pennentrek (letters R, W en Z),
- het verschil in hoogte tussen de linker- en rechterkant (letters U, V, W, Y)
- het begin en einde van een pennentrek te lang of te kort maken (letters E, G, H, L en de cijfers 1, 3, 4, 5, 9).

Ondanks deze afwijkingen zijn alle tekens van het alfabet herkenbaar en is er geen verwarring mogelijk tussen bepaalde tekens. Bijgevolg is deze reconstructie van het Graffiti alfabet voldoende nauwkeurig om naar ASCII-tekst te worden omgezet.

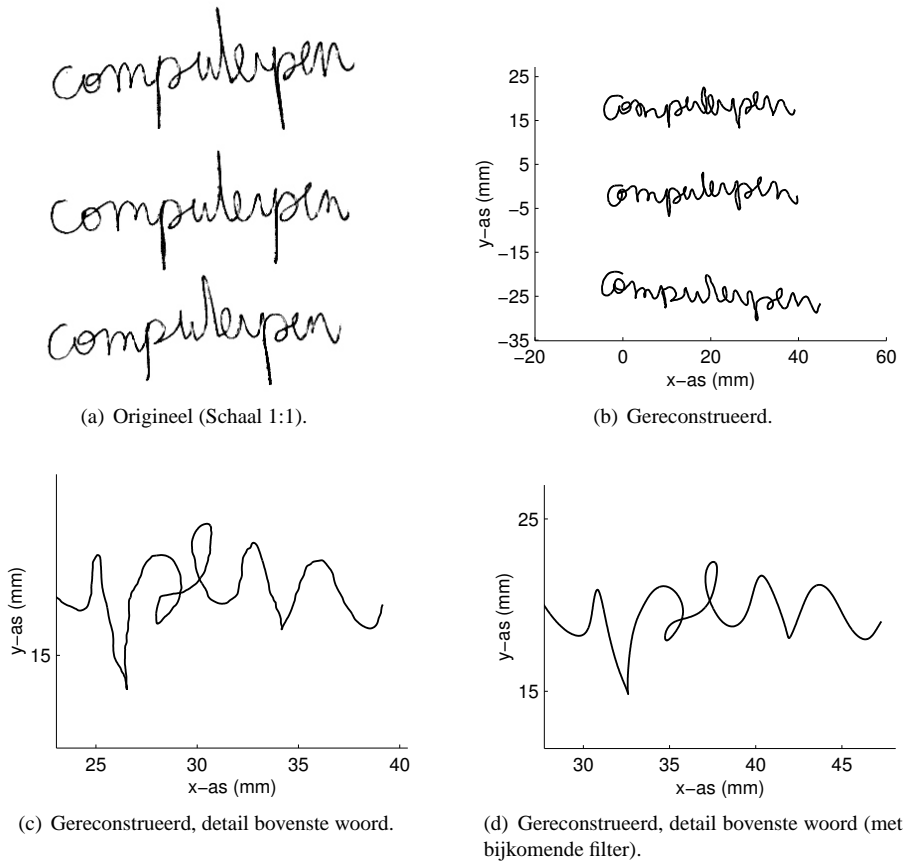
### 6.3.2 Schrijven van een woord uit één pennentrek

Voor de schrijftesten met een woord in een natuurlijk handschrift is geopteerd voor het woord 'computerpen'. Dit woord heeft relatief een grote lengte (11 letters) waardoor een in de tijd toenemende fout duidelijk zichtbaar is.

Figuur 6.9(b) toont de reconstructie van het woord 'computerpen'. Het origineel - op papier geschreven en later ingescande - woord wordt getoond in figuur 6.9(a). Het gereconstrueerde woord is in de x-richting uitgerekt, waardoor de lengte van het woord 51mm is in plaats van 37mm (factor 1.4). Vooral bij letters waarbij de penpunt achtereenvolgens naar boven en naar beneden beweegt (bijvoorbeeld de t en p) is deze afwijking duidelijk zichtbaar. In de y-richting is de hoogte van de letters met een factor 0.7 kleiner. Bovenop deze afwijkingen is de eerste letter (c) steeds sterk vervormd. Dit duidt op een mogelijk afwijkend wrijvingsgedrag aan het begin van een pennentrek. Een mogelijke oorzaak is het stilstaan van de kogel van de vulling op het moment dat de inktvulling het papier met een snelheid raakt. In de regimetoestand, waarbij het wrijvingsmodel opgesteld is, rolt de kogel immers steeds over het papier. Ondanks deze afwijkingen is zijn de woorden herkenbaar en leesbaar.

Een kleine verbetering van de leesbaarheid wordt bekomen door de signalen te filteren met een laagdoorlaatfilter (Butterworth, 4e orde, 20Hz). Aangezien de breekfrequentie van deze filter gelijk is aan de hoogst te meten frequentie, zal deze filter een invloed uitoefenen op het te meten frequentiebereik (0..20Hz). Zoals figuur 6.9(d) echter aantoon, is deze invloed eerder positief voor de leesbaarheid. Vooral aan de letter p is deze verbetering merkbaar.

Alhoewel het algoritme de tekst leesbaar kan reconstrueren, vormt het ontbreken van de luchtfase een ernstige obstakel. Hierdoor kan er geen streepje aan de t of een puntje op de i geplaatst worden. Bovendien schrijven veel mensen een woord niet aan elkaar. In dat geval is enkel de reconstructie van de afzonderlijke delen van het woord mogelijk, zonder de relatieve positionering van beide delen. Naar analogie met het Graffiti handschrift moet het ingeven van een spatie tussen woorden gebeuren door een horizontale streep te trekken.



Figuur 6.9: Reconstructie van het woord 'computerpen'.

## 6.4 Besluit

Dit hoofdstuk vormt het sluitstuk van voorgaande hoofdstukken. De oriëntatiesensor, ontwikkeld in hoofdstuk 3, en de optische krachtsensor, ontwikkeld in hoofdstuk 4 zijn geïntegreerd in een prototype van een schrijvende computerpen. Verder is de benodigde software ontwikkeld voor het reconstrueren van een pennentrek. Deze software is gebaseerd op het wrijvingsmodel dat in hoofdstuk 5 geïdentificeerd is.

Met dit prototype zijn verschillende schrijftesten gedaan om de mogelijkheden en beperkingen van een schrijvende computerpen aan te tonen. Deze schrijftesten tonen aan dat het prototype losse letters en cijfers in het Graffiti handschrift herkenbaar reconstrueert. Er bestaan wel kleine afwijkingen bij de gereconstrueerde letters, maar verwarring tussen letters is niet mogelijk.

Ook het reconstrueren van een woord in een natuurlijk handschrift geeft een herkenbaar resultaat. Toch is het gereconstrueerde woord sterk geschaald (een factor 1.4

in de schrijfrichting en een factor 0.7 in de hoogte). Het gebruik van een laagdoorlaatfilter (Butterworth, 4e orde, 20Hz) zorgt voor een vloeiender geschreven woord, waardoor de leesbaarheid verbetert. De mogelijkheden van het reconstrueren van een woord in een natuurlijk handschrift is echter beperkt door het ontbreken van de lucht-fase. Het is bijvoorbeeld niet mogelijk om een streepje aan de t of een puntje op de i te zetten. Bovendien moet het woord in één pennentrek geschreven zijn. Bij woorden die uit meerdere pennentrekken bestaan, kunnen enkel de afzonderlijke pennentrekken gereconstrueerd worden, zonder hun relatieve positionering.

## Hoofdstuk 7

# Algemeen besluit en richting voor verder onderzoek

In dit doctoraat is een compact invoerapparaat voor mobiele toepassingen zoals laptops, PDA's en GSM's ontwikkeld. Dit invoerapparaat bestaat uit een intelligente computerpen, die zijn positie aan de hand van interne sensoren bepaalt. Op deze manier kan de computerpen zijn beweging en dus de geschreven tekst reconstrueren op het computerscherm. Om geen eisen aan de omgeving op te leggen, werkt deze computerpen in een niet-gestructureerde omgeving, zonder toevoeging van kunstmatige vaste bakens.

Het werkingsprincipe van deze computerpen is gebaseerd op een drie-assige krachtensor, die de snelheidsafhankelijke wrijvingskracht tussen penpunt en papier meet, en een oriëntatiesensor, die oriëntatie van de pen meet. Met de informatie van deze sensoren kan de snelheid van de penpunt tijdens het schrijven berekend worden. Integratie van deze snelheid geeft de positie van de penpunt en dus het gereconstrueerde woord. In de lucht kan geen beweging gemeten worden aangezien de wrijvingskrachten dan wegvallen. Uitbreiding naar het meten van de beweging in de lucht door middel van een bijkomende accelerometer is echter niet mogelijk. Hiervoor is de nauwkeurigheid van een oriëntatiesensor met de huidige stand van de techniek te beperkt.

De focus van het doctoraat ligt bijgevolg op het meten van de beweging tijdens het schrijven op papier. Hiervoor zijn drie onderdelen belangrijk: de oriëntatiesensor, de krachtensor en het wrijvingsmodel.

### De oriëntatiesensor

Het concept van de oriëntatiesensor is gebaseerd op het meten van de zwaartekracht en het aardmagnetisch veld. De elevatiehoek  $\theta$  en de spinhoek  $\psi$  worden uit de richting van de zwaartekracht berekend en de azimuthhoek  $\varphi$  volgt uit de richting van het aardmagnetisch veld. De nauwkeurigheid van dit concept wordt fundamenteel beperkt door de versnelling van de pen tijdens het schrijven en metalen voorwerpen in de nabije omgeving van de pen. Hierdoor kan de vereiste nauwkeurigheid van de oriëntatiesensor in de luchtfase ( $0.02^\circ$ ) niet gehaald worden.

De oriëntatiesensor bestaat uit twee commercieel verkrijgbare sensoren: de micro-accelerometer ADXL202 en de magnetische sensor HMC1022. Voor beide sensoren is een kalibratieprocedure opgesteld, waarbij de oriëntatiesensor in verschillende oriëntaties geplaatst wordt. Hiervoor is een kalibratiestand met een nauwkeurigheid van  $0.1^\circ$  ontwikkeld. Deze kalibratiestand onderscheidt zich van andere doordat hij het aardmagnetisch veld niet beïnvloedt. Na kalibratie bedraagt de spreiding op de nauwkeurigheid van de azimuthhoek, de elevatiehoek en de spinhoek respectievelijk  $1.41^\circ$ ,  $0.45^\circ$  en  $0.69^\circ$ .

### **De krachtsensor**

Voor de drie-assige krachtsensor zijn twee alternatieven uitgewerkt. Het eerste alternatief bestaat uit drie piëzo-elementen, die in een buis geïntegreerd zijn. Deze sensor heeft een hoge gevoeligheid, waardoor frequenties tot  $32 \cdot 10^{-6}$  Hz meetbaar zijn. De temperatuursgevoeligheid van de sensor is echter hoog. Hierdoor is de sensor niet geschikt voor een computerpen, aangezien deze pen - en dus de sensor - tijdens het schrijven opwarmt door de lichaamswarmte van de hand.

Als tweede alternatief is een optische krachtsensor ontwikkeld. Deze krachtsensor is gebaseerd op een flexibele structuur, die de kracht omzet naar een translatie van de vullinghouder. Deze translatie wordt gemeten door drie LED-fotodiode paren, waartussen een sluiters beweegt. De flexibele structuur is voorzien van aanslagen om de sensor tegen overbelasting te beschermen. Het ontwerp resulteert in een sensor met afmetingen  $\phi 12$  mm x 45.6 mm. De optische krachtsensor haalt een nauwkeurigheid van 0.02 N en heeft een bereik van  $\pm 2$  N.

### **Het wrijvingsmodel**

Naast het ontwikkelen van sensoren, is in dit doctoraat ook de wrijving tussen penpunt en papier experimenteel geïdentificeerd. Voor deze experimenten is een tribometer gebouwd, die toelaat om de wrijving tussen penpunt en papier te meten. Speciaal aan deze tribometer is zijn tweede translatiebeweging, loodrecht op de oscillerende hoofdbeweging, waardoor de penpunt steeds over een nieuw stuk papier schrijft. Vervolgens is het geïdentificeerde één-dimensionale wrijvingsmodel uitgebreid naar een twee-dimensionaal model door de wrijving in het raakvlak van de beweging te beschouwen. Deze uitbreiding naar twee dimensies is een betere benadering van de realiteit dan het toepassen van een één-dimensionaal wrijvingsmodel voor elke as apart. Validatie-experimenten tonen aan dat de vorm van een pennentrek nauwkeurig gereconstrueerd wordt, maar de grootte niet. Toch blijft de vorm van het traject steeds herkenbaar.

### **Het geheel**

Het ontwerp van de oriëntatiesensor en de krachtsensor resulteert in een prototype van een schrijvende computerpen. Dit prototype heeft als afmetingen  $\phi 20$  mm x 222 mm. Het prototype is in staat om losse letters in het Graffiti handschrift te reconstrueren. Ondanks enkele kleine afwijkingen, zoals het niet sluiten van de letter o, zijn alle letters herkenbaar en is er geen verwarring tussen letters mogelijk. Daarnaast kan het

prototype ook letters en woorden in een natuurlijk handschrift herkenbaar reconstrueren op voorwaarde dat het woord in één pennentrek geschreven wordt.

### **Richtingen voor toekomstig onderzoek**

Door het ontbreken van de luchtfase heeft de ontwikkelde computerpen slechts een beperkte functionaliteit. Enkel letters en woorden die in één pennentrek geschreven worden, kunnen gereconstrueerd worden. Deze beperkte functionaliteit in combinatie met een relatief hoge kostprijs (250€ in de detailhandel) zorgen voor een onzekere toekomst van dit product. De resultaten van dit werk kunnen echter ook gebruikt worden voor een afgeleid product, namelijk een computerpen voor het verifiëren van handtekeningen. Deze computerpen moet niet noodzakelijk over een luchtfase beschikken. Bovendien mag de kostprijs hoger zijn, aangezien financiële instellingen bereid zijn om geld te investeren in de beveiliging van hun transacties. Het is vooral in dit opzicht dat verder onderzoek aan deze computerpen moet gesitueerd worden. Dit toekomstig onderzoek is in drie luiken op te splitsen.

Een eerste richting voor verder onderzoek is het gebruik van vibrerende micro-gyroscoopen in de oriëntatiesensor. Deze micro-gyroscoopen zijn momenteel in volle ontwikkeling. Hun nauwkeurigheid vertienvoudigt elke twee jaar, waardoor de nauwkeurigheid van de luchtfase eventueel realiseerbaar wordt. Bovendien worden drie-assige micro-gyroscoopen in de nabije toekomst verwacht.

Een tweede verbetering bestaat uit een vermindering van de kostprijs van de optische krachtsensor. Hiervoor moet de elastische structuur herwerkt worden naar een spuitgegoten structuur. Bovendien kan de binnendiameter van de optische verplaatsingsmeetsysteem vergroot worden, zodat de krachtsensor dichterbij de penpunt zit en het moment op de krachtsensor vermindert.

Een derde richting voor verder onderzoek is het ontwerpen van een speciale inktvulling, zodat de spreiding op het verband tussen wrijvingskracht en snelheid minimaal is. Fenomenen zoals inktklodders, splits in het inktspoor of het onderbreken van het inktspoor moeten onderzocht worden.





# CV Auteur

Joeri Clijnen, geboren in Wilrijk op 9 november 1975, studeerde in 1998 af aan de K.U.Leuven als Burgerlijk Werktuigkundig-Elektrotechnisch ingenieur, richting Mechanica, optie Mechatronica. Direct na zijn studies vervoegde hij de micro- en precisiegroep op het departement Mechanica, afdeling PMA, aan de K.U.Leuven. Daar startte hij met een doctoraat in de Toegepaste Wetenschappen onder supervisie van prof. D. Reynaerts en prof. H. Van Brussel. Gedurende zijn doctoraat werkte hij mee aan Inter-Universitaire AantrekkingsPolen (IUAP P4-24). Daarnaast heeft hij tijdens zijn doctoraat verscheidene publicaties geschreven of eraan meegewerkt:

- ▷ J. Clijnen, D. Reynaerts, and H. Van Brussel, "Calibration of orientation measurement systems based on tilt-sensors and compasses", Euspen 2002, Eindhoven, Nederland, 26-30 mei 2002, p443-446
- ▷ J. Clijnen, W. Meeusen, D. Reynaerts, H. Van Brussel, R. Simons, and K. Plesers, "Design and realisation of an optical bi-axial miniature inclination sensor", IEEE Sensor 2002, Orlando, 12-14 juni 2002, p870-873
- ▷ J. Clijnen, D. Reynaerts and H. Van Brussel, "Design of an optical tri-axial force sensor", SPIE Photonics 2002, Brugge, 30okt-1nov 2002, p 129-136
- ▷ W. Meeusen, J. Clijnen, D. Reynaerts, H. Van Brussel, and R. Puers, "Micro-electro-discharge machining as microsensor fabrication technology", IEEE Journal, accepted
- ▷ J. Clijnen, D. Reynaerts, and H. Van Brussel, "Design and realisation of a miniaturised tri-axial force sensor based on an optical measurement principle", Proc. of Photonics in Mechanical and Industrial Processes Measurements and Quality Control, Photomec 02, Louvain-La-Neuve, 20 February, 2003
- ▷ J. Clijnen, D. Reynaerts, and H. Van Brussel, "Design and realisation of an optical tri-axial force sensor", Proc. of International Precision Assembly Seminar, Bad Hofgastein, 17-19 March, 2003, pp219-224
- ▷ J. Peirs, J. Clijnen, P. Herijgers, D. Reynaerts, H. Van Brussel, B. Corteville and S. Boone, "Design of an Optical Force Sensor for Force Feedback during Minimally Invasive Robotic Surgery", pp. 1063-1066
- ▷ J. Clijnen, D. Reynaerts, and H. Van Brussel, "Development of a miniature optical tri-axial force sensor", Euroensors XVII, Sept. 2003, pp. 748-751



# Bibliografie

- [1] “Officiële website van compaq.” <http://www.compaq.com>.
- [2] “Officiële website van ericsson.” <http://www.ericsson.com>.
- [3] “Officiële website van palm.” <http://www.palm.com>.
- [4] “Officiële website van targus stowaway.” <http://www.foldingkeyboard.com>.
- [5] “Officiële website van logitech.” <http://www.logitech.com>.
- [6] “Officiële website van vkb.” <http://www.vkb.co.il>.
- [7] H.P.Messmer, *Toetsenborden en muizen*, pp. 847–881. Addison Wesley, 2e druk ed., 1994.
- [8] “Officiële website van microsoft.” <http://www.Microsoft.com>.
- [9] “Officiële website van kensington.” <http://www.kensington.com>.
- [10] “Officiële website van trust.” <http://www.trust.com>.
- [11] A. Meyer, “Pen computing: A technology overview and a vision,” *SIGCHI*, vol. 27, no. 3, pp. 46–90, 1995.
- [12] “Officiële website van numonics.com.” <http://www.numonics.com>.
- [13] S. Khudanpur, “The basic mathematics of automatic speech recognition,” in *IMA Workshop*, 2000.
- [14] “Officiële website van anoto pen.” <http://www.anoto.com>.
- [15] “Chatpen cha-30.” <http://www.sonyericsson.com>.
- [16] “Officiële website van otm technologies.” <http://www.otmtech.com>.
- [17] “Officiële website van pen2net.” <http://www.compupen.com>.
- [18] “Officiële website van e-pen.” <http://www.e-pen.com>.
- [19] “Officiële website van de onderzoeksafdeling van btexact technologies (british telecommunications).” <http://www.labs.bt.com>.

- [20] "Improving on the cocktail napkin." <http://research.microsoft.com/msrnews/smartquill.asp>.
- [21] De Schrijver,S. and Claesen,L. and Brosens,F. and Devreese,J.T. and Coudron,R. and De Mey,B. and Diddens,D. and Reynaerts,D., *Vorderingsverslag I.W.T.-project SMARTPEN fase 1*. SMARTPEN N.V., 1993.
- [22] Diddens,D. and Reynaerts,D. and Van Brussel,H., *Vorderingsverslag I.W.T.-project SMARTPEN Fase 2 Deel A: Ontwikkeling van de kracht-acceleratiesensor en hoeksensor*. Leuven, Belgium: K.U.Leuven, Departement Werktuigkunde, Afdeling PMA, ref. 94R38, 1994.
- [23] Georis,O. and Reynaerts,D. and Van Brussel,H., *Vorderingsverslag I.W.T.-project Smartpen Deel B: Appendices*. Leuven, Belgium: K.U.Leuven, Departement Werktuigkunde, Afdeling PMA, ref. 94R38, 1994.
- [24] D. Reynaerts and H. Van Brussel, "Design of an advanced computer writing tool," in *Proc. 6th Symp. Micro Machine and Human Science*, (Nagoya, Japan), pp. 229–234, 1995.
- [25] D. Diddens, D. Reynaerts, and H. Van Brussel, "Design of a ring-shaped three-axis micro force/torque sensor," in *Sensor and Actuators*, vol. A, pp. 46–47, 1995.
- [26] Steegen,S., *Specificaties voor sensoren voor de hoekmetingen*. Departement Werktuigkunde, Katholieke Universiteit Leuven, 1-8-1998.
- [27] D.Verduyn, *Studie van wrijving tijdens het schrijven*. Departement Werktuigkunde, Katholieke Universiteit Leuven, 2002.
- [28] "Officiële website van krypton." <http://www.krypton.be>.
- [29] B.Cosemans and G.Geysen, *Ontwerp van een sensorconfiguratie voor positie-oriëntatiebepaling van een computerpen*. Katholieke Universiteit Leuven, Departement Werktuigkunde, Eindwerk nr. 00EP32, 2000.
- [30] J.Peirs, *Design of micromechatronic systems: scale law technologies, and medical applications*. KULEuven, Departement Mechanica, Divisie PMA, ISBN90-5682-247-0, 2001.
- [31] H. Kato, "Photoelectric inclination sensor for controlling the attitude of millimachine," in *The second Int. Symp. on Micro Machine and Human Science*, (Nagoya), pp. 93–101, 1991.
- [32] J. Lötters, J. Bomer, A. Verloop, E. Droog, W. Olthuis, P. Veltink, and P. Bergveld, "Design, fabrication and characterization of a highly symmetrical capacitive triaxial accelerometer," *Sensors and Actuators A*, vol. 66, pp. 205–212, 1998.
- [33] Analog Devices, *Datasheet of ADXL202E*. Analog Devices;, 2000.

- [34] R. De Reus, J. Gulløv, and P. Scheeper, "Fabrication and characterization of a piezoelectric accelerometer," in *MME 1998*, pp. 202–205, 1998.
- [35] L. Roylance and J. Angell, "A batch-fabricated silicon accelerometer," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-26, pp. 1911–1917, 1979.
- [36] P. Barth, F. Pourahmadi, R. Mayer, J. Poydock, and K. Petersen, "A monolithic silicon accelerometer with integral air damping and overrange protection," in *Solid State Sensors and Actuators Workshop*, (Hilton Head Island, SC), pp. 35–38, 1988.
- [37] U. Dauderstädt, P. Sarro, and P. French, "Temperature dependence and drift of a thermal accelerometer," *Sensors and Actuators A*, vol. 66, pp. 244–249, 1998.
- [38] G. Schröpfer, W. Elflein, M. De Labachellerie, H. Porte, and S. Ballandras, "Lateral optical accelerometer micromachined in (100) silicon with remote readout based on coherence modulation," *Sensors and Actuators A*, vol. 68, pp. 344–349, 1998.
- [39] J. Kalenik and R. Pajak, "A cantilever optical-fiber accelerometer," *Sensors and Actuators A*, vol. 68, pp. 350–355, 1998.
- [40] J. Plaza, A. Liobera, J. Berganzo, J. Garcia, C. Dominguez, and J. Esteve, "Stress free quad beam optical silicon accelerometer," in *IEEE Sensor 2002*, vol. 2, (Orlando, Florida, U.S.A.), pp. 1064–1068, 2002.
- [41] A. Liobera, J. Plaza, I. Salinas, J. Berganzo, J. Garcia, C. Dominguez, and J. Esteve, "Arrow-based optical accelerometers," in *IEEE Sensors 2002*, vol. 2, pp. 1075–1079, 2002.
- [42] C.-H. Liu, A. Barzilai, J. Reynolds, A. Partridge, T. Kenny, J. Grade, and H. Rockstad, "Characterization of a high-sensitivity micromachined tunneling accelerometer with micro-g resolution," *Journal of Microelectromechanical systems*, vol. 7, no. 2, pp. 235–244, 1998.
- [43] D. Chang, R. Kubena, F. Stratton, D. Kirby, R. Joyce, and J. Kim, "Wafer-bonded, high dynamic range, single-crystalline silicon tunneling accelerometer," in *IEEE Sensors 2002*, vol. 2, (Orlando, Florida, U.S.A.), pp. 860–863, 2002.
- [44] P. Ohlckers, R. Holm, H. Jakobson, T. Kvisteroy, G. Kittilsland, A. Larsen, M. Nese, S. Nilsen, and A. Ferber, "An integrated resonant accelerometer microsystem for automotive applications," *Sensors and Actuators A*, vol. 66, pp. 99–104, 1998.
- [45] S. Seok, S. Seong, J. Kim, and K. Chun, "A high performance mixed micro-machined differential resonant accelerometer," in *IEEE Sensors 2002*, vol. 2, (Orlando, Florida, U.S.A.), pp. 1058–1063, 2002.

- [46] M. Aikele, K. Bauer, W. Ficker, F. Neubauer, U. Prechtel, J. Schalk, and H. Seidel, "Resonant accelerometer with self-test," in *Eurosensors XIV*, (Copenhagen, Denmark), pp. 217–218, 2000.
- [47] K. Jono, M. Hashimoto, and M. Esashi, "Electrostatic servo system for multi-axis accelerometers," *IEEE MEMS*, pp. 251–256, 1994.
- [48] N. Yazdi, F. Ayazi, and K. Najafi, "Micromachined inertial sensors," *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, no. 8, 1998.
- [49] M. Kraft, "Micromachined inertial sensors: State of the art and a look into the future," *IMC Measurement and Control*, vol. 33, no. 6, pp. 164–168, 2000.
- [50] Analog Devices, *Datasheet of ADXL202*. Analog Devices, 1998.
- [51] G.W.C.Kaye and T.H.Laby, *Tables of Physical and Chemical Constants*. Longmans, 1973.
- [52] A.Bray, G.Barbato, and R.Levi, *Theory and practice of force measurement*. Academic Press, 1990.
- [53] H. Moritz, "Geodetic reference system 1980," *Bull.Géodésigne*, vol. 62, pp. 348–356, 1988.
- [54] J. Lenz, "A review of magnetic sensors," *Proceedings of the IEEE*, vol. 78, no. 6, pp. 973–989, 1990.
- [55] "Officiële website van dinsmore sensors." <http://www.dinsmoresensors.com>.
- [56] J.Borenstein, H.R.Everett, and L.Feng, *Where am I? Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning*. The University of Michigan, 1996.
- [57] R. Popovic, "Tutorial: Magnetic sensor microsystems," in *IEEE Sensors 2002*, (Orlando, Florida, USA), 2002.
- [58] "Officiële website van honeywell." <http://www.honeywell.com>.
- [59] F. Schreutelkamp, "Het aardmagnetische veld ontrafeld," *Zenit*, vol. 28, pp. 136–141, 2001.
- [60] F. Schreutelkamp, "Het aardmagnetische veld ontrafeld," *Zenit*, vol. 28, pp. 186–190, 2001.
- [61] NoAuthor, "Documents of the nrpb volume 3 no 1," 1992.
- [62] H.R.Everett, *Sensors for mobile Robots: Theory and application*. A K Peters, 1995.
- [63] G. Martin, "Gyroscopes may cease spinning," *IEEE Spectrum*, vol. February, pp. 48–53, 1986.
- [64] K.Böhm and R.Rodloff, *Optical Rotation Sensors*, pp. 421–465. VCH, 1992.

- [65] D.A.Krohn, *Fiber Optic sensors: fundamentals and applications*. Instrument society of America, 1988.
- [66] W. Chow, J. Gea-Banacloche, L. Pedrotti, V. Sanders, W. Schleich, and M. Scully, "The ring laser gyro," *Reviews of Modern Physics*, vol. 57, no. 1, pp. 61–104, 1985.
- [67] S. Lee, "Tutorial: Micro-machined vibratory gyroscope," in *IEEE Sensor 2002*, (Orlando, Florida, USA), pp. T-1/30–T-1/49, 2002.
- [68] Analog Devices, *Datasheet of ADXRS150*. Analog Devices, [http: www.analog.com](http://www.analog.com), 2003.
- [69] J.Nocedal and S.J.Wright, *Numerical Optimization*. Springer, 1987.
- [70] G. De Gersem, E. Vander Poorten, and H. Van Brussel, "Human machine interaction in endoscopic applications," in *BSMEE Conf. on Virtual Reality in Mechanical and Production Engineering VR-MECH'01*, (Brussels, Belgium), pp. 211–216, 2001.
- [71] M. Cavusoglu, A. Sherman, and F. Tendick, "Bilateral controller design for telemanipulation in soft environments," in *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, (Seoul, Korea), pp. 1045–1052, 2001.
- [72] T. Ortmaier, D. Reintsema, U. Seibold, U. Hagn, and G. Hirzinger, "The dlr minimally invasive robotics surgery scenario," in *Workshop on Advances in Interactive Multimodal Telepresence Systems*, (Munich, Germany), pp. 29–30, 2001.
- [73] H.Flemmer, *Analysis of Force Reflecting Control Methods for Teleoperators with Special Reference to Surgical Applications*. Mechatronics Lab, Department of Machine Design, Royal Institute of Technology, KTH, 2000.
- [74] Boone,S. and Corteville,B., *Ontwikkeling van een geminiaturiseerde optische 3-assige krachtsensor voor haptische controle bij endoscopische robotchirurgie*. Leuven: KULeuven, afdeling PMA, Eindwerk nr. 03EP08, 2003.
- [75] H. Van Brussel, J. Peirs, D. Reynaerts, A. Delchambre, G. Reinhart, N. Roth, M. Weck, and E. Zussmann, "Assembly of microsystems," *annals of CIRP*, vol. 49 (2), pp. 451–472, 2000.
- [76] Y. Ansel, F. Schmitz, S. Kunz, G. Gruber, and G. Popovic, "Development of tools for handling and assembling microcomponents," in *Journal of micromechanics and microengineering*, vol. 12, pp. 430–437, 2002.
- [77] J.P.Bentley, *Principles of Measurement Systems*. Longman Group Limited, 1995.
- [78] T.Polak and C.Pande, *Engineering measurements, methods and intrinsic errors*. Professional Engineering Publishing Limited London and Bury St Edmunds, UK, 1999.

- [79] K.Uchino, *Piezoelectric actuators and ultrasonic motors*. Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [80] D. Damjanovic and R. Newnham, "Electrostrictive and piezoelectric materials for actuator applications," *Intell.Mater.Syst.and Struct.*, vol. 3, pp. 190–207, 1992.
- [81] ANSI and IEEE Standard 176-1987, *An American National Standard and an IEEE Standard on piezoelectricity*. Standards Committee of the IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Society, 1988.
- [82] Xinetics, *Smartpen triaxial angle sensor (Tri Angle)*. Xinetics Inc., ref. MS97-154, 1997.
- [83] "Website van kistler." <http://www.kistler.com>.
- [84] H.H.Bau, N.F.deRooij, and B.Kloeck, *Sensors, a comprehensive Survey Volum 7: Mechanical sensors*. VCH, 1994.
- [85] K.Hoffmann, *Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmeßstreifen*. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1987.
- [86] "Website van ati industrial automation." <http://www.ati-ia.com>.
- [87] "Miniaturized 6dof fingertip force/torque sensor with full digital output." <http://www.robotic.dlr.de/mechatronics/minift/>.
- [88] D. Viet Dao, T. Toriyama, J. Wells, and S. Sugiyama, "Development of six-degree of freedom micro force sensor for application in geophysics," in *IEEE Sensor 2002*, vol. 2, (Orlando, USA), pp. 973–978, 2002.
- [89] W. Jin and J. Mote, "A six-component silicon force sensor," *Sensors and Actuators A*, vol. 65, pp. 109–115, 1998.
- [90] K. Okada, "Flat-type six-axial force-sensor," in *Digest of the 9th Sensor Symposium*, pp. 245–248, 1990.
- [91] A. Fernandez, F. Berghmans, B. Brichard, P. Megret, M. Decreton, M. Blondel, and A. Delchambre, "Multi-component force sensor based on multiplexed fibre bragg grating strain sensors," *Meas.Sci.Technol.*, vol. 12, pp. 810–813, 2001.
- [92] R. Wiegerink, R. Zwijze, R. Mateman, G. Krijnen, T. Lammerink, and M. Elwenspoek, "Quasi monolithic silicon load cell for loads up to 1000kg with distributed capacitive sensing," in *Euroensors XIII*, (The Hague, The Netherlands), pp. 1049–1052, 1999.
- [93] W. Olthuis, B. Kooi, J. Bomer, and P. Bergveld, "Load to capacitance transfer using different spring elements in capacitive transducers," *Sensors and Actuators A*, vol. 85, pp. 256–261, 2000.



- [94] E. Enikov and B. Nelson, "Three-dimensional microfabrication for a multi-degree-of-freedom capacitive force sensor using fibre-chip coupling," *Micromechanics and Microengineering*, vol. 10, pp. 492–497, 2000.
- [95] Y. Sun, B. Nelson, D. Potasek, and E. Enikov, "A bulk microfabricated multi-axis capacitive cellular force sensor using transverse comb drives," *Micromechanics and Microengineering*, vol. 12, pp. 832–840, 2002.
- [96] S. Knowles, B. Jones, S. Purdy, and C. France, "Multiple microbending optical fibre sensors for measurement of fuel quantity in aircraft fuel tanks," in *Euroensors XI, The 11th European Conference on Solid State Transducers*, (Warsaw, Poland), pp. 59–62, 1997.
- [97] R. Zwijze, R. Wiegeling, G. Krijnen, T. Lammerink, and M. Elwenspoek, "Low creep and hysteresis load cell based on a force-to-fluid pressure transformation," *Sensors and Actuators*, vol. 78, pp. 74–80, 1999.
- [98] C. Gehin, C. Barthod, and Y. Teisseyre, "Design and characterisation of a new force resonant sensor," *Sensors and Actuators A*, vol. 84, pp. 65–69, 2000.
- [99] C. Barthod, Y. Teisseyre, C. Gehin, and G. Gautier, "Resonant force sensor using a pll electronic," *Sensors and Actuators A*, vol. 3638, pp. 1–8, 2003.
- [100] M. Madou, *Fundamentals of microfabrication*. CRC Press, 1997.
- [101] R. Grisar, *Sources of Optical Sensing*, pp. 117–142. VCH, 1992.
- [102] J. Angerstein, *UV-Visible and Near IR Semiconductor Sensors*, pp. 173–199. VCH, 1992.
- [103] M. Griot, *Optics Guide 5*. Melles Griot, 1990.
- [104] W. Kester, *Praktical Design techniques for sensor signal conditioning*. Analog Devices, 1999.
- [105] H. Buczek, *Optical Components*, pp. 39–75. VCH, 1992 ed., 1992.
- [106] P. Nussbaum, R. Völkel, H. Herzig, and R. Dändliker, "Micro-optics for sensor applications," in *Micro-Optical Technologies for Measurement, Sensors, and Microsystems*, vol. 2783, (Besançon, France), pp. 55–63, 1996.
- [107] A. J. Rogers, *Optical-Fiber sensors*, pp. 355–398. VCH, 1992.
- [108] R. Claus, "Optical fiber sensors," in *IEEE Sensors2002*, vol. Tutorial Lecture Notes, (Orlando), 2002.
- [109] FME, *Draadvonkerosie*. Vereniging FME, 1990.
- [110] C. Sommer, *Non-traditional Machining Handbook*. Advance Publishing, Inc., 2000.
- [111] R. D. Arnell, P. B. Davies, J. Halling, and T. L. Whomes, *Tribology: principles and design applications*. Macmillan, 1991.

- [112] B. Armstrong-Hélouvry, P. Dupont, and C. Canudas De Wit, "A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction," *Automatica*, vol. 30, no. 7, pp. 1083–1138, 1994.
- [113] F. Al-Bender, V. Lampaert, S. Fassois, D. Rizos, K. Worden, D. Engster, A. Hornstein, and U. Parlitz, "Measurement and identification of pre-sliding friction dynamics," in *4th Int. Symp. Investigation of Non-Linear Dynamic Effects in Production Systems*, (Chemnitz, Germany), 2003.
- [114] V. Lampaert, J. Swevers, and Al-Bender, "A novel generic model at asperity level for dry friction force dynamics," *Tribology Letters*, vol. 16, no. 1, 2004.
- [115] Y. Hatamura, "A ring shape 6-axis force sensor and its applications," in *Proc. Int. Conf. Advanced Mechatronics*, (Tokyo, Japan), pp. 647–652, 1989.
- [116] J.J.Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. Addison-Wesley, 1986.
- [117] S.Lorenzo and S.Bruno, *Modeling and control of robot manipulators*. Mc. Graw-Hill, 1996.
- [118] Simons,R. and Plessers,K., *Ontwerp en realisatie van een biaxiale miniatuur inclinometer*. Leuven: KULeuven, Afdeling PMA, Eindwerk nr. 99EP19, 1999.

# Bijlage A

## Voorgaand Smartpen project

*Aan dit doctoraat is een I.W.T.<sup>1</sup> project [21, 22, 23, 24, 25] voorafgegaan. De eerste fase van dit project werd gestart in 1993. De partners waren IMEC, KULeuven Afdeling PMA, Smartpen N.V., U.I.A. Departement Natuurkunde en Lernhout & Hauspie Speechproducts N.V.. In deze fase werd een voorstudie verricht naar de haalbaarheid van de Smartpen. De fundamentele concepten werden uitgewerkt, de beperkingen werden bepaald, de haalbaarheid van bepaalde technologieën, materialen en processen werden gecontroleerd en de specifieke toepassingsgebieden werden afgebakend. Dit onderzoek toonde de uitvoerbaarheid aan en gaf een basis voor verder onderzoek. In de tweede fase ('93-'94) werd deze basis verder uitgewerkt tot een eerste prototype, dat geschikt is voor het verifiëren van handtekeningen. Deze fase werd uitgevoerd door Smartpen N.V., IMEC, KULeuven Afdeling PMA en R.U.Gent. Aangezien dit prototype aan de basis van het doctoraat ligt, wordt het in deze bijlage besproken.*

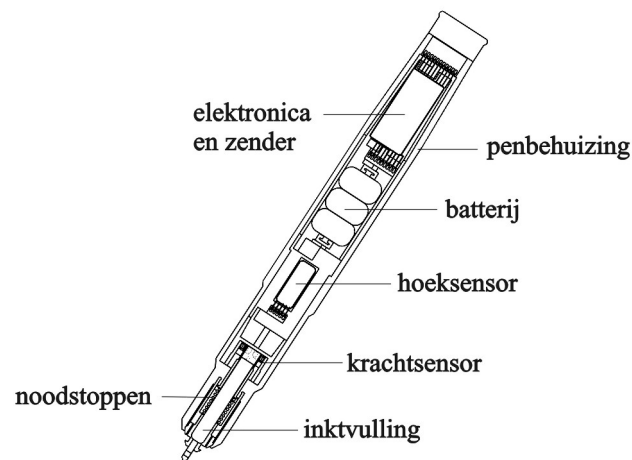
### A.1 Algemene beschrijving

#### A.1.1 Onderdelen van het prototype

Figuur A.1 toont het schema van het prototype. Het prototype heeft de vorm en afmetingen van een marker ( $\phi 18mm$ ). In de pentip zit een inktvulling, zodat het prototype op papier schrijft. De inktvulling is vastgemaakt aan de vullinghouder, die op zijn beurt aan de krachtsensor vastgelijmd is. Deze krachtsensor is voorzien van noodstoppen om de sensor tegen overbelasting te beschermen. Achter de krachtsensor is de oriëntatiesensor gemonteerd, die het kantelen van de pen meet. Verder is een batterij voorzien die de elektronica voedt. Deze elektronica zorgt voor de signaalverwerking, de digitalisering en het verzenden van de informatie naar de computer. Tot slot is er vooraan in de pen plaats voorzien voor twee drukknoppen (niet op tekening) waarmee klassieke muisfuncties gerealiseerd kunnen worden. Al deze onderdelen zijn gemonteerd in een penbehuizing. De elektrische bedrading is in deze behuizing geïntegreerd,

---

<sup>1</sup>I.W.T. = Vlaams Instituut voor de bevordering van het Wetenschappelijk-Technologisch onderzoek in de industrie



Figuur A.1: De interne delen van de Smartpen [24].

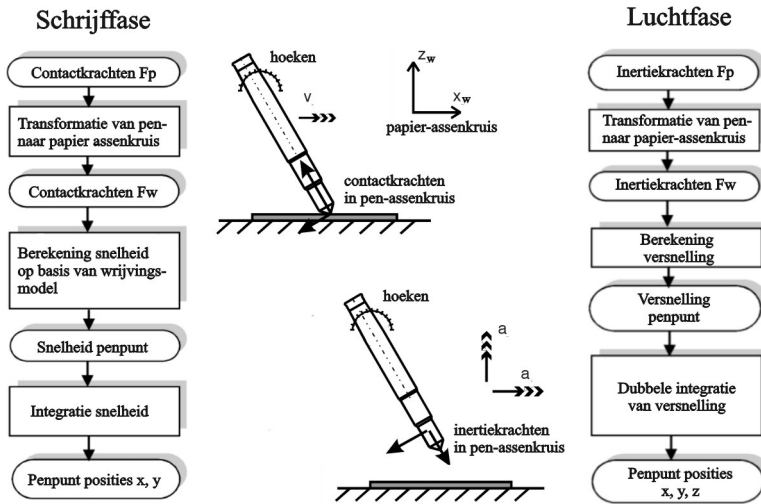
zodat een aanzienlijke plaats- en kostenbesparing bekomen wordt.

### A.1.2 Werkingsprincipe

Het werkingsprincipe van de Smartpen maakt onderscheid tussen twee werkingsvoorwaarden: de schrijffase, waarbij de penpunt contact maakt met het papier, en de luchtfase, waarbij de penpunt in de lucht beweegt. Figuur A.2 toont het werkingsprincipe tijdens beide fasen.

Tijdens de schrijffase bestaan er tussen de penpunt en het papier reactie- en wrijvingskrachten. Deze krachten worden gemeten met een drie-assige krachtsensor vastgemaakt aan de penpunt. Hierdoor meet de krachtsensor de krachten in het bewegend pen-assenstelsel, vastgemaakt aan de pen. Door de oriëntatie van de pen te meten, kunnen deze wrijvingskrachten getransformeerd worden naar het papier-assenstelsel, vastgemaakt aan de omgeving. Vervolgens wordt de snelheid van de penpunt berekend met behulp van een viskeus wrijvingsmodel, dat het verband tussen de wrijvingskracht en de snelheid van de penpunt geeft. Integratie van deze snelheid geeft de opeenvolgende posities van de penpunt en dus het geschreven woord.

Tijdens de luchtfase bestaan er geen wrijvingskrachten. De pen bepaalt zijn positie door de versnelling van de penpunt te meten. Door aan de penpunt een massa te hangen, kan de versnelling van de penpunt met de drie-assige krachtsensor gemeten worden. In de lucht meet de krachtsensor dus de versnelling van de penpunt in het pen-assenstelsel. Met behulp van een oriëntatiemeting van de pen kan deze versnelling naar het papier-assenstelsel getransformeerd worden. Na dubbele integratie van deze versnelling, worden de opeenvolgende posities van de penpunt bekomen en dus de afgelegde weg in de lucht.



Figuur A.2: Het werkingsprincipe van de Smartpen [24].

## A.2 Krachtsensor

### A.2.1 Specificaties

De drie-assige krachtsensor heeft een dubbele taak. Tijdens de schrijffase meet hij de contactkrachten tussen penpunt en papier en tijdens de luchtfase meet hij de versnellingen van de penpunt. Hierbij hebben de schrijfkrachten een bereik van  $\pm 2\text{N}$ . De maximale krachtenvariatie is beperkt tot  $500\text{N/s}$ . De versnelling varieert tussen  $\pm 3\text{m/s}^2$ . Met een massa van  $30\text{ gram}$  geeft dit inertiekrachten tussen  $\pm 0.09\text{N}$ . Het dubbel gebruik van de krachtsensor heeft bijgevolg ernstige gevolgen voor de vereiste gevoeligheid. Er zit immers een factor 22 tussen de maximale schrijfkrachten en de maximale inertiekrachten. Dit verschil kan niet verkleind worden door de massa te vergroten omdat het gewicht van de pen dan teveel toeneemt.

Aangezien de sensor in de nabijheid van de pentip gemonteerd is, is de beschikbare ruimte voor de krachtsensor beperkt tot een cilinder met een buiten diameter van  $12\text{mm}$  en een totale lengte van  $20\text{mm}$ . Om plaats te voorzien voor de inktvulling is de sensor hol met een binnendiameter van  $7.5\text{mm}$ .

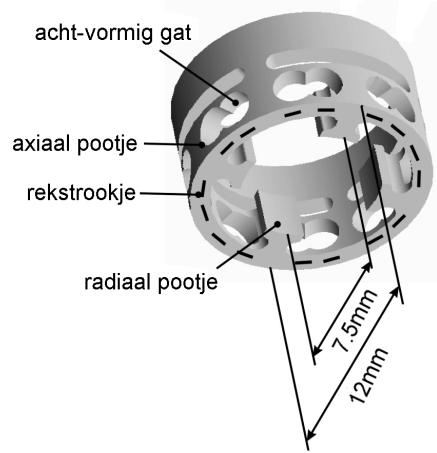
Ook de stijfheid van de krachtsensor is belangrijk. Veel gebruikers ervaren een soepele penpunt als oncomfortabel. Daarom wordt de verplaatsing van de penpunt beperkt tot maximaal  $0.5\text{mm}$ .

### A.2.2 Principe

De krachtsensor is gebaseerd op halfgeleider rekstrookjes. Deze keuze is gebaseerd op de hoge gevoeligheid, de lage kostprijs en de mogelijkheid tot automatisatie. De

gebruikte rekstrookjes zijn van het merk D.J. Instruments Inc. en hebben een nominale versterkingsfactor (G factor) van 140, een maximale rek van  $5000\mu$ -rek en een lengte van 1.5mm.

De krachtsensor, getoond in figuur A.3, is een vereenvoudiging van de zes-assige krachtsensor die Hatamura [115] voorstelde. Hij bestaat uit een ringvormige structuur met 4 radiale en 4 axiale pootjes. De axiale pootjes zijn verbonden met de penbehuizing die als een mechanische grond werkt. Aan de binnenkant van de radiale pootjes wordt de vullinghouder gelijmd, die de inktvulling bevat. Door de acht-vormige gaten vervormt de structuur onder de te meten krachten. Deze vervorming wordt opgemeten door 16 rekstrookjes die op het bovenzvlak van de sensor bevestigd zijn.



Figuur A.3: De krachtsensor [24].

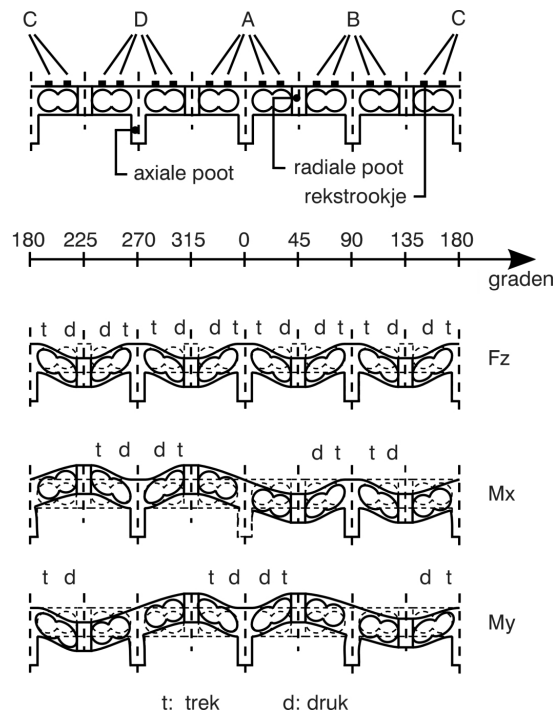
Figuur A.4 verduidelijkt het werkingsprincipe. Wanneer uitsluitend een normaalkracht  $F_z$  wordt uitgeoefend op de sensor, verplaatsen alle radiale pootjes gelijkmatig. De resulterende rek in het bovenzvlak van de sensor wordt gemeten met 16 rekstrookjes, die geschakeld zijn in 4 volledige Wheatstone bruggen A, B, C, D. De normaalkracht  $F_z$  kan dan berekend worden uit de spanningen  $V_A, V_B, V_C, V_D$  van de 4 bruggen volgens:

$$F_z \sim V_A + V_B + V_C + V_D. \quad (\text{A.1})$$

Het aanleggen van een radiaalkracht op de penpunt geeft een moment op de ringvormige structuur. Hierdoor gaat één paar radiale pootjes naar boven en het tegenovergestelde paar radiale pootjes naar beneden. Bijgevolg kunnen de momenten  $M_x$  en  $M_y$  bepaald worden aan de hand van:

$$\begin{aligned} M_x &\sim (V_B - V_D) \\ M_y &\sim (V_A - V_C) \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

Indien de afstand tussen penpunt en sensor gekend is, kunnen deze momenten omgerekend worden naar de radiale krachten  $F_x$  en  $F_y$  op de penpunt.



Figuur A.4: Het werkingsprincipe van de krachtensor [24].

In praktijk komen de drie krachten gelijktijdig voor en moeten de drie vervormingstoestanden opgeteld worden. Bovenstaande formules blijven echter geldig.

### A.2.3 Experimentele resultaten

Door middel van statische testen is het verband tussen de brugspanningen en de aangelegde krachten bepaald. De afwijkingen ten opzichte van de formules (A.1) en (A.2) worden veroorzaakt door de verschillende gevoeligheden van de vier Wheatstone bruggen. Deze verschillen ontstaan bij de manuele fabricage van de sensor. Oorzaken zijn onder andere het niet nauwkeurig kleven van de rekstrookjes en de variërende dikte van de lijmlaag. Naast de manuele montage, spelen ook de variaties in de dikte van de acht-structuren een rol.

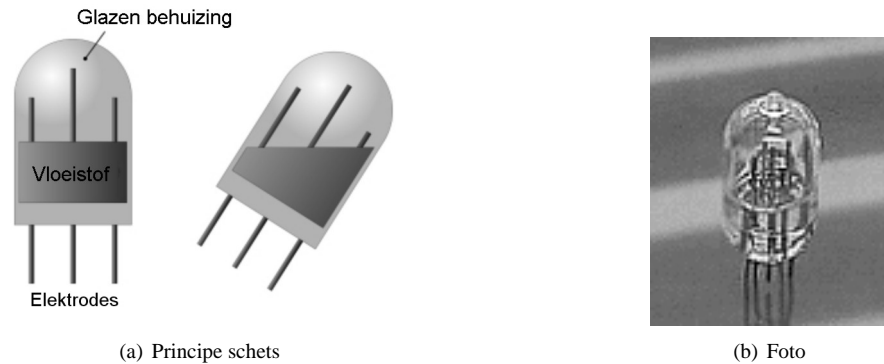
Rekening houdend met deze kalibratie, vertoont de sensor een lineair gedrag, met een globale nauwkeurigheid van 0.015N voor axiale krachten en 0.005N voor tangentiële krachten. Dit komt neer op een nauwkeurigheid van respectievelijk 0.75% en 0.25% van het voorziene bereik van de schrijfkrachten. Het verschil in gevoeligheid tussen de axiale richting en de tangentiële richtingen wordt deels verklaard door het stijfheidsverschil in deze richtingen.

Tijdens de experimenten is een aanzienlijke drift van de Wheatstone bruggen vastgesteld. Deze drift wordt veroorzaakt door temperatuursgradiënten in de sensor.

### A.3 Oriëntatiesensor

De oriëntatiesensor meet het kantelen van de computerpen. Deze informatie wordt gebruikt om de gemeten krachten in het pen-assenstelsel te transformeren naar het papier-assenstelsel.

Er bestaan verschillende manieren om de oriëntatie van een voorwerp te meten: accelerometers die de richting van de zwaartekracht meten, vloeistof-hoeksensoren, gyroscopen, elektrische kompassen, . . . Door de tijdsbeperking in het project is de meest eenvoudige oplossing gekozen, namelijk een commercieel beschikbare elektrolytische hoeksensor SP5000. Deze sensor, getoond in figuur A.5, bestaat uit een reservoir dat half gevuld is met een elektrolytische vloeistof. Hij meet zijn oriëntatie ten opzichte van het vrije vloeistofoppervlak, dat onder invloed van de zwaartekracht steeds horizontaal ligt. Deze meting gebeurt door de weerstandsverandering te meten tussen 5 elektrodes die in de vloeistof steken. De specificaties van de sensor staan in tabel A.1.



Figuur A.5: De elektrolytische hoeksensor SP5000 [30].

Tabel A.1: De specificaties van de elektrolytische hoeksensor SP5000 [30]

bereik	$\pm 50$ graden
gevoeligheid	200mV/graad
herhaalbaarheid	0.01 graad
lineariteit	
tussen $\pm 45$ graden	10% van het bereik
tussen $\pm 30$ graden	4% van het bereik
tussen $\pm 15$ graden	0.5% van het bereik
uitslingertijd	500ms
resolutie	0.005 graden

De SP5000 meet niet de volledige oriëntatie van de pen. Een rotatie rond een verticale verandert de relatieve positie van het vloeistofoppervlak ten opzichte van de



elektrodes niet en kan bijgevolg niet gemeten worden. In eerste instantie werd deze derde hoek constant verondersteld, maar een gedetailleerde studie toont aan dat dit niet correct is. Een betere oplossing bestaat uit een incrementele methode, waarbij niet alleen de ogenblikkelijke signalen in de oriëntatieberekening gebruikt worden, maar ook de signalen van de vorige sampleperiode. Op basis hiervan worden de infinitesimale rotatie berekend tussen tijdstip  $i-1$  en  $i$ . De som van al deze infinitesimale rotaties geeft de uiteindelijke oriëntatie. Voor een meer gedetailleerde uitwerking wordt verwezen naar het I.W.T. verslag [22].

## A.4 Wrijvingsmodel

Het wrijvingsmodel berekent de snelheid van de penpunt op basis van de opgemeten wrijvingskrachten. In het I.W.T. project is er geen experimenteel onderzoek gedaan naar een nauwkeurig wrijvingsmodel. Het gebruikte model gaat uit van een theoretisch viskeus wrijvingsmodel waarbij een lineair verband tussen de snelheid  $v$  en de wrijvingskracht  $F_w$  bestaat, namelijk:

$$F_w = F_z(\mu_{\text{statisch}} + \mu_{\text{dynamisch}}v), \quad (\text{A.3})$$

met  $F_z$  de normaalkracht. Door deze formule te herschrijven kan de snelheid  $v$  berekend worden uit de wrijvingskracht  $F_w$  en de normaalkracht  $F_z$  volgens:

$$v = \frac{1}{\mu_{\text{dynamisch}}} \left( \frac{F_w}{F_z} - \mu_{\text{statisch}} \right). \quad (\text{A.4})$$

De parameters  $\mu_{\text{statisch}}$  en  $\mu_{\text{dynamisch}}$  zijn afhankelijk van de inktvulling en de papersoort. Ze worden proefondervindelijk bepaald door de gebruiker een eenvoudige schrijftest te laten uitvoeren.

De uitbreiding naar een beweging in een vlak gebeurt op basis van de veronderstelling dat de wrijving in de x-richting niet beïnvloed wordt door de wrijving in de y-richting. Bovenstaand wrijvingsmodel wordt bijgevolg voor elke as apart toegepast.

## A.5 Bespreking voorgaand project

### A.5.1 Bespreking krachtsensor

De ontworpen krachtsensor voldoet aan alle vorm- en volumebeperkingen. Zijn nauwkeurigheid volstaat voor het meten van de schrijfkrachten (0.75% en 0.25%), maar is niet voldoende om de versnelling van de penpunt nauwkeurig te meten. De inertiekrachten zijn immers een factor 22 kleiner dan de wrijvingskrachten. De behaalde nauwkeurigheid van de accelerometere is hierdoor beperkt tot 17% voor de axiale versnellingen en 6% voor de radiale versnellingen. Bijgevolg moet bij een nieuw prototype de functie van het meten van de wrijvingskracht en de versnelling van de penpunt opgesplitst worden in twee aparte sensoren.

De krachtsensor is speciaal ontworpen voor goedkope serieproductie. De structuur kan met een CNC-automaat aangemaakt worden en alle rekstrookjes liggen in

één vlak, wat de montage sterk vereenvoudigt. Toch is de kostprijs van deze sensor te hoog. Om te beginnen is de vereiste nauwkeurigheid voor de acht-vormige gaten hoog (0.01mm op de lameldikte). Dit resulteert automatisch in een hogere prijsklasse. Verder is de kwaliteitscontrole van de sensoren niet eenvoudig door de complexe geometrie van de sensor. Daarbovenop was het de bedoeling om een techniek te ontwikkelen om de rekstrookjes samen met de bedrading in één keer te monteren. Hierin is men echter niet geslaagd: de rekstrookjes moeten individueel gemonteerd worden, waardoor de kostprijs van de montage hoog is.

### **A.5.2 Bespreking oriëntatiesensor**

De elektrolytische hoeksensor heeft een aantal beperkingen. Om te beginnen is de uitslingertijd (500ms) te groot. Hierdoor is het onmogelijk om de dynamische beweging van de pen tijdens het schrijven te meten. Het gewenste frequentiebereik ligt immers tussen 0 en 20Hz, met de voornaamste frequenties rond 5Hz. Door deze hoge frequenties, klotst de vloeistof in het reservoir en zijn nauwkeurige metingen onmogelijk. Door aanpassing van de viscositeit van de vloeistof kan de uitslingertijd teruggebracht worden tot 200ms, maar deze verlaging is ontoereikend. Elektrolytische hoeksensoren zijn daarom niet geschikt voor de toepassing.

Een tweede probleem is de niet-detecteerbare hoek. De voorgestelde incrementele methode zorgt voor een foutenopstapeling waardoor het gebruik van de sensor in de tijd beperkt is. Bovendien is de beweging rond een verticale as niet detecteerbaar. Een bijkomende sensor, die niet op de zwaartekracht gebaseerd is, is vereist.

Tot slot oefent de versnelling een invloed uit op sensoren die hun oriëntatie bepalen op basis van de zwaartekracht. Hierdoor is de nauwkeurigheid van deze sensoren fundamenteel beperkt.

### **A.5.3 Bespreking wrijvingsmodel**

Het verband (A.4) is gebaseerd op een theoretisch model. Experimentele bevestiging van dit verband ontbreekt echter. Bovendien is de veronderstelling dat de wrijving in de x- en y-richting onafhankelijk zijn van elkaar niet theoretisch gefundeerd.

## **A.6 Besluit**

Uit het voorgaand Smartpen project kunnen de volgende besluiten getrokken worden:

- De krachtsensor moet vervangen worden omdat hij te duur is en een hoge temperatuursgevoeligheid vertoont.
- De functie van het meten van de wrijvingskracht en de versnelling van de penpunt moet opgesplitst worden. Het grote verschil in bereik tussen beide grootheden zorgt immers voor een onvoldoende resolutie bij het meten van de versnelling.

- De elektrolytische hoeksensor SP5000 moet vervangen worden door een andere sensor met een groter frequentiebereik. Hiervoor is een ander meetprincipe vereist.
- Een bijkomende sensor is vereist om de rotatie rond de verticale as te meten. Deze rotatie is immers niet meetbaar door een sensor die de richting van de zwaartekracht meet.
- Het wrijvingsmodel moet experimenteel geverifieerd en verfijnd worden. Ook de uitbreiding naar een beweging in een vlak moet opnieuw bestudeerd worden.



## Bijlage B

# Hoekconventies

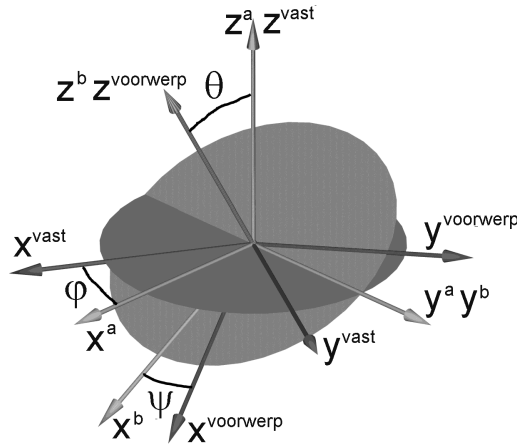
*Volgens de analytische mechanica van onvervormbare voorwerpen heeft elk voorwerp zes vrijheidsgraden, namelijk drie translatie- en drie rotatievrijheidsgraden. Drie hoeken volstaan dus om de oriëntatie van een voorwerp volledig te bepalen. Om deze hoeken te definiëren, kan men kiezen uit verschillende gangbare conventies, zoals de Eulerhoeken en de RPY-hoeken. Deze conventies worden in paragraaf B.1 gedefinieerd. Paragraaf B.2 geeft het verband tussen deze hoeken en de transformatiematrix, die een vector van een voorwerp-assenstelsel naar een vast assenstelsel transformeert en omgekeerd. Deze transformatiematrix wordt onder andere gebruikt voor de transformatie van de opgemeten krachten in het pen-assenstelsel naar de krachten in het vast assenstelsel.*

### B.1 Definities

#### B.1.1 Eulerhoeken

De Eulerhoeken zijn gedefinieerd als drie opeenvolgende elementaire rotaties rond een as van een *geroteerd assenstelsel*. Dit wil zeggen dat de tweede elementaire rotatie gebeurt rond een as van het - door de eerste elementaire rotatie - geroteerde assenstelsel [116, 117]. Analoog gebeurt de derde elementaire rotatie rond een as van het - door de vorige twee elementaire rotaties - geroteerde assenstelsel. Binnen de Eulerhoeken bestaan er twaalf verschillende varianten, naargelang rond welke assen geroteerd wordt. Om deze varianten aan te geven, worden de letters van de gebruikte assen meegegeven in de naam.

Om deze definitie te verduidelijken, toont figuur B.1 de ZYZ-Eulerhoeken. In de begin valt het voorwerp-assenstelsel samen met het vast assenstelsel. De eerste elementaire rotatie roteert het voorwerp-assenstelsel over een hoek  $\varphi$  rond de z-as van het vast assenstelsel. Deze hoek  $\varphi$  wordt de azimuthhoek genoemd. Daarna roteert het voorwerp-assenstelsel over een hoek  $\theta$  rond de y-as van het reeds geroteerde assenstelsel {a}. Deze hoek  $\theta$  is de elevatiehoek. Tot slot roteert het voorwerp-assenstelsel bij de derde elementaire rotatie  $\psi$  rond de z-as van het geroteerde assenstelsel {b}. De hoek  $\psi$  is de spinhoek.



Figuur B.1: De ZYZ-Eulerhoeken.

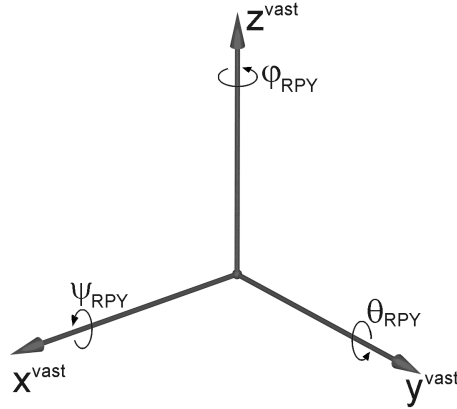
Om te vermijden dat er voor dezelfde oriëntatie meerdere sets van ZYZ-Eulerhoeken bestaan, moeten de hoeken begrenst worden. De azimuthhoek  $\varphi$  varieert naar analogie met de astronomie en de geografie van  $-180^\circ$  tot  $180^\circ$ . De elevatiehoek  $\theta$  varieert tussen  $-90^\circ$  en  $90^\circ$  en de spinhoek  $\psi$  is beperkt tot  $\pm 180^\circ$ .

De ZYZ-Eulerhoeken vertonen een singulariteit bij  $\theta = 0^\circ$ . In dat geval valt de  $z$ -as van het vast assenstelsel samen met het  $z$ -as van het geroteerde assenstelsel  $\{b\}$ . Dit heeft als gevolg dat er geen onderscheid meer bestaat tussen de azimuthhoek  $\varphi$  en de spinhoek  $\psi$ . Door deze singulariteit hebben nabijgelegen oriëntaties geen nabijgelegen sets van Eulerhoeken. Om numerieke onstabilditeiten te vermijden, dienen kleine elevatiehoeken dus vermeden te worden.

### B.1.2 RPY-hoeken

De RPY-hoeken zijn gedefinieerd als drie opeenvolgende elementaire rotaties rond een as van *het vast assenstelsel* [116, 117]. Er bestaan verschillende varianten, afhankelijk van rond welke as eerst gedraaid wordt. De meest gebruikte variant, afkomstig van de scheepvaart, is getoond in figuur B.2. De  $z$ -as van het vast assenstelsel ligt volgens de lengterichting van de boot en de  $x$ -as ligt loodrecht op de zeespiegel. Vertrekkend van een voorwerp-assenstelsel dat samenvalt met het vast assenstelsel, wordt het voorwerp-assenstelsel over een hoek  $\psi_{RPY}$  rond de  $x$ -as van het vast assenstelsel geroteerd (het gieren van een schip). De volgende rotatie  $\theta_{RPY}$  gebeurt rond de  $y$ -as van het vast assenstelsel (het stampen van een schip). De laatste rotatie over een hoek  $\varphi_{RPY}$  gebeurt rond de  $z$ -as van het vast assenstelsel (het rollen van een schip).

RPY-hoeken zijn speciaal ontwikkeld voor kleine hoeken. Er treden geen singulariteiten op wanneer een RPY-hoek naar  $0^\circ$  gaat. Daarentegen zijn de RPY-hoeken slecht gedefinieerd wanneer de hoek  $\theta_{RPY}$   $90^\circ$  wordt.



Figuur B.2: De RPY-hoeken.

## B.2 Transformatiematrices

Vectoren kunnen zowel volgens het vast assenstelsel als volgens het voorwerp-assenstelsel gedefinieerd worden. Neem  $\vec{p}^{voorwerp}$  een vector gedefinieerd volgens het voorwerp-assenstelsel en  $\vec{p}^{vast}$  een vector gedefinieerd volgens het vast assenstelsel. Tussen beide bestaat het volgende verband:

$$\begin{aligned} \vec{p}^{vast} &= R \vec{p}^{voorwerp}, \\ \vec{p}^{voorwerp} &= R^T \vec{p}^{vast}. \end{aligned} \quad (\text{B.1})$$

Hierbij is  $R$  de transformatiematrix. Deze transformatiematrix wordt berekend uit de drie hoeken die de oriëntatie van het voorwerp-assenstelsel vastleggen [117]. Voor de ZYZ-Eulerhoeken gebeurt dit volgens:

$$R_{ZYZ} = \begin{bmatrix} c_\varphi c_\theta c_\psi - s_\varphi s_\psi & -c_\varphi c_\theta s_\psi - s_\varphi c_\psi & c_\varphi s_\theta \\ s_\varphi c_\theta c_\psi + c_\varphi s_\psi & -s_\varphi c_\theta s_\psi + c_\varphi c_\psi & s_\varphi s_\theta \\ -s_\theta c_\psi & s_\theta s_\psi & c_\theta \end{bmatrix}, \quad (\text{B.2})$$

en voor RPY-hoeken volgens:

$$R_{RPY} = \begin{bmatrix} c_\varphi c_\theta & c_\varphi s_\theta s_\psi - s_\varphi c_\psi & c_\varphi s_\theta c_\psi + s_\varphi s_\psi \\ s_\varphi c_\theta & s_\varphi s_\theta s_\psi + c_\varphi c_\psi & s_\varphi s_\theta c_\psi - c_\varphi s_\psi \\ -s_\theta & c_\theta s_\psi & c_\theta c_\psi \end{bmatrix}. \quad (\text{B.3})$$

Hierbij staat  $c$  voor cosinus en  $s$  voor sinus. De afleiding van bovenstaande formules is te vinden in [117].





## Bijlage C

# Formules bij de oriëntatiemeetprincipes

Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van de verschillende meetprincipes voor het bepalen van de oriëntatie van een voorwerp in een niet-gestructureerde omgeving. Deze principes zijn gebaseerd op de zwaartekracht, het aardmagnetisch veld, de hoeksnelheid of de hoekversnelling. Bij elk principe zijn de formules voor de berekening van de hoeken en de foutvoortplanting naar de hoeken vermeld. Deze bijlage gaat dieper in op de afleiding van deze formules.

### C.1 Meetprincipe op basis van de zwaartekracht

#### C.1.1 Formules voor de hoeken

##### Formules voor de Euler-hoeken

In een vast assenstelsel is de zwaartekracht voor te stellen als een vector  $\vec{g} = [0 \ 0 \ -g]^T$ . De projectie van deze vector op het bewegend voorwerp-assenstelsel (waaraan de sensor vastgemaakt is) is te schrijven als:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}_{\text{voorwerp}} &= R_{ZYZEuler}^T \vec{g}, \\ &= \begin{bmatrix} c_\varphi c_\theta c_\psi - s_\varphi s_\psi & -c_\varphi c_\theta s_\psi - s_\varphi s_\psi & c_\varphi s_\theta \\ s_\varphi c_\theta c_\psi + c_\varphi s_\psi & -s_\varphi c_\theta s_\psi - c_\varphi c_\psi & s_\varphi s_\theta \\ -s_\theta c_\psi & s_\theta s_\psi & c_\theta \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix}, \\ &= -g \begin{bmatrix} -s_\theta c_\psi \\ s_\theta s_\psi \\ c_\theta \end{bmatrix}. \end{aligned} \tag{C.1}$$

Hierbij is  $c$  de verkorte notatie voor cosinus en  $s$  de verkorte notatie voor sinus.

Een drie-assige accelerometer meet de drie componenten  $[a_x \ a_y \ a_z]_{voorwerp}^T$  van de versnelling. De formules voor de hoeken  $\theta$  en  $\psi$  volgen uit (C.1):

$$\theta = \text{bgtg}\left(\frac{-\sqrt{(a_x^{voorwerp})^2 + (a_y^{voorwerp})^2}}{a_z^{voorwerp}}\right), \quad (\text{C.2})$$

$$\psi = \text{bgtg}\left(\frac{-a_y^{voorwerp}}{a_x^{voorwerp}}\right). \quad (\text{C.3})$$

Bij het gebruik van een twee-assige accelerometer worden enkel de componenten  $a_x^{voorwerp}$  en  $a_y^{voorwerp}$  gemeten. De formule voor de hoek  $\psi$  blijft geldig. Voor de hoek  $\theta$  geldt echter:

$$\theta = \text{bgsin}\left(\frac{\sqrt{(a_x^{voorwerp})^2 + (a_y^{voorwerp})^2}}{g}\right). \quad (\text{C.4})$$

### Formules voor de RPY-hoeken

In een vast assenstelsel is de zwaartekracht voor te stellen als een vector  $\vec{g} = [0 \ 0 \ -g]^T$ . De projectie van deze vector op het bewegend voorwerp-assenstelsel is gelijk aan:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}_{voorwerp} &= R_{RPY}^T \vec{g}, \\ &= \begin{bmatrix} c_\varphi c_\theta & c_\varphi s_\theta s_\psi - s_\varphi c_\psi & c_\varphi s_\theta c_\psi + s_\varphi s_\psi \\ s_\varphi c_\theta & s_\varphi s_\theta s_\psi + c_\varphi c_\psi & s_\varphi s_\theta c_\psi - c_\varphi s_\psi \\ -s_\theta & c_\theta s_\psi & c_\theta c_\psi \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix}, \\ &= -g \begin{bmatrix} -s_\theta \\ c_\theta s_\psi \\ c_\theta c_\psi \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (\text{C.5})$$

Een drie-assige accelerometer meet de drie componenten  $[a_x \ a_y \ a_z]_{voorwerp}^T$  van de versnelling. Hieruit kunnen de hoek  $\theta$  en  $\psi$  berekend worden met de formules:

$$\theta = \text{bgtg}\left(\frac{a_x^{voorwerp}}{\sqrt{(a_y^{voorwerp})^2 + (a_z^{voorwerp})^2}}\right), \quad (\text{C.6})$$

$$\psi = \text{bgtg}\left(\frac{a_y^{voorwerp}}{a_z^{voorwerp}}\right). \quad (\text{C.7})$$

Deze formules volgen rechtstreeks uit (C.5).

Een twee-assige accelerometer meet enkel de componenten  $a_x^{voorwerp}$  en  $a_y^{voorwerp}$ . De formules voor de hoeken  $\theta$  en  $\psi$  zijn dan:

$$\theta = \text{bgsin}\left(\frac{a_x^{voorwerp}}{g}\right), \quad (\text{C.8})$$

$$\psi = \text{bgsin}\left(\frac{-a_y^{voorwerp}}{\sqrt{g^2 - (a_x^{voorwerp})^2}}\right). \quad (\text{C.9})$$

Deze formules volgen rechtstreeks uit (C.5).

## C.1.2 Formules voor de foutenvoortplanting bij een twee-assige accelerometere

### Met Euler-hoeken

De hoek  $\theta$  wordt berekend met formule (C.4). De spreiding op deze hoek door de spreiding  $\sigma_{a_i}^2$  op de gemeten versnelling is gelijk aan:

$$\begin{aligned}
 \sigma_\theta^2 &= \left(\frac{\delta f}{\delta a_x}\right)^2 \sigma_{a_x}^2 + \left(\frac{\delta f}{\delta a_y}\right)^2 \sigma_{a_y}^2, \\
 &= \left(\left(\frac{\delta f}{\delta a_x}\right)^2 + \left(\frac{\delta f}{\delta a_y}\right)^2\right) \sigma_{a_i}^2, \\
 &= \frac{\sigma_{a_i}^2}{(a_z)^2}, \\
 &= \frac{\sigma_{a_i}^2}{(gc_\theta)^2}.
 \end{aligned} \tag{C.10}$$

Bijgevolg geldt:

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_{a_i}}{gc_\theta}. \tag{C.11}$$

De hoek  $\psi$  wordt berekend met formule (C.3). De spreiding op deze hoek door de spreiding op de gemeten versnelling is gelijk aan:

$$\begin{aligned}
 \sigma_\psi^2 &= \left(\frac{\delta f}{\delta a_x}\right)^2 \sigma_{a_x}^2 + \left(\frac{\delta f}{\delta a_y}\right)^2 \sigma_{a_y}^2, \\
 &= \left(\left(\frac{\delta f}{\delta a_x}\right)^2 + \left(\frac{\delta f}{\delta a_y}\right)^2\right) \sigma_{a_i}^2, \\
 &= \frac{\sigma_{a_i}^2}{(a_x)^2 + (a_y)^2}, \\
 &= \frac{\sigma_{a_i}^2}{(gs_\theta)^2}.
 \end{aligned} \tag{C.12}$$

Bijgevolg geldt:

$$\sigma_\psi = \frac{\sigma_{a_i}}{gs_\theta}. \tag{C.13}$$

### Met RPY-hoeken

De hoek  $\theta$  wordt berekend met formule (C.8). De spreiding op deze hoek door de spreiding  $\sigma_{a_i}^2$  op de gemeten versnelling is gelijk aan:

$$\begin{aligned}
 \sigma_\theta^2 &= \left(\frac{\delta f}{\delta a_x}\right)^2 \sigma_{a_x}^2, \\
 &= \left(\frac{\delta f}{\delta a_x}\right)^2 \sigma_{a_i}^2, \\
 &= \frac{\sigma_{a_i}^2}{g^2 - (a_x)^2}, \\
 &= \frac{1}{(gc_\theta)^2} \sigma_{a_i}^2.
 \end{aligned} \tag{C.14}$$

Bijgevolg geldt:

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_{a_i}}{gc_\theta}. \tag{C.15}$$

De hoek  $\psi$  wordt berekend volgens formule (C.9). De spreiding op deze hoek door de spreiding op de gemeten versnelling is gelijk aan:

$$\begin{aligned}\sigma_\psi^2 &= \left(\frac{\delta f}{\delta a_x^{\text{voorwerp}}}\right)^2 \sigma_{a_x^{\text{voorwerp}}}^2 + \left(\frac{\delta f}{\delta a_y^{\text{voorwerp}}}\right)^2 \sigma_{a_y^{\text{voorwerp}}}^2, \\ &= \frac{\sigma_{a_i^{\text{voorwerp}}}^2}{a_z^2} \left(1 + \frac{(a_x^{\text{voorwerp}})^2 (a_y^{\text{voorwerp}})^2}{(g^2 - (a_x^{\text{voorwerp}})^2)^2}\right).\end{aligned}\quad (\text{C.16})$$

Voor een kleine hoek  $\theta$  ( $< 25^\circ$ ) is de term onder de vierkantswortel bij benadering gelijk aan 1 zodat de formule vereenvoudigd kan worden tot:

$$\begin{aligned}\sigma_\psi &\simeq \frac{\sigma_{a_i^{\text{voorwerp}}}}{a_z}, \\ &\simeq \frac{\sigma_{a_i^{\text{voorwerp}}}}{g c_\theta c_\psi}.\end{aligned}\quad (\text{C.17})$$

## C.2 Meetprincipe op basis van het aardmagnetisch veld

### C.2.1 Formules voor de Euler-hoeken

Kies een vast assenstelsel zodanig dat het aardmagnetisch veld in het yz-vlak ligt. Het magnetisch veld  $\vec{B}$  is dan gelijk aan  $[0 \ B_y \ B_z]^T_{\text{vast}}$ . De projectie van deze vector op het bewegend voorwerp-assenstelsel is te schrijven als:

$$\begin{aligned}\vec{B}^{\text{voorwerp}} &= R_{ZYZEuler}^T [0 \ B_y \ B_z]^T_{\text{vast}}, \\ &= \begin{bmatrix} c_\varphi c_\theta c_\psi - s_\varphi s_\psi & -c_\varphi c_\theta s_\psi - s_\varphi c_\psi & c_\varphi s_\theta \\ s_\varphi c_\theta c_\psi + c_\varphi s_\psi & -s_\varphi c_\theta s_\psi + c_\varphi c_\psi & s_\varphi s_\theta \\ -s_\theta c_\psi & s_\theta s_\psi & c_\theta \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 0 \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix}_{\text{vast}}, \\ &= \begin{bmatrix} (s_\varphi c_\theta c_\psi + c_\varphi s_\psi) B_y^{\text{vast}} - s_\theta c_\psi B_z^{\text{vast}} \\ (-s_\varphi c_\theta s_\psi + c_\varphi c_\psi) B_y^{\text{vast}} + s_\theta s_\psi B_z^{\text{vast}} \\ s_\varphi s_\theta B_y^{\text{vast}} + c_\theta B_z^{\text{vast}} \end{bmatrix}.\end{aligned}\quad (\text{C.18})$$

Een drie-assige magnetische sensor meet de drie componenten van  $\vec{B}^{\text{voorwerp}}$ . Op deze manier worden drie vergelijkingen bekomen, waaruit de azimuthoek  $\varphi$  berekend kan worden. Herschrijf hiervoor de derde vergelijking naar  $B_z^{\text{vast}}$  en substitueer  $B_z^{\text{vast}}$  in de overige twee vergelijkingen. Dit resulteert in:

$$B_x^{\text{voorwerp}} + s_\theta c_\psi c_\theta^{-1} B_z^{\text{voorwerp}} = (s_\varphi c_\theta c_\psi + c_\varphi s_\psi + s_\theta^2 c_\psi c_\theta^{-1} s_\varphi) B_y^{\text{vast}}, \quad (\text{C.19})$$

$$B_y^{\text{voorwerp}} - s_\theta s_\psi c_\theta^{-1} B_z^{\text{voorwerp}} = (-s_\varphi c_\theta s_\psi + c_\varphi c_\psi - s_\theta^2 s_\psi c_\theta^{-1} s_\varphi) B_y^{\text{vast}}. \quad (\text{C.20})$$

De linker termen van beide vergelijkingen bevat de hoek  $\psi$  niet. Stel de linker term van vergelijking (C.19) gelijk aan a en de linker term van vergelijking (C.20) gelijk aan b. Vermenigvuldig het linkerlid van (C.19) met het rechterlid van (C.20) en stel dit gelijk aan het product van het rechterlid van (C.19) met het linkerlid van (C.20). Dit resulteert in:

$$a(-s_\varphi c_\theta s_\psi + c_\varphi c_\psi - s_\theta^2 s_\psi s_\varphi c_\theta^{-1}) = b(s_\varphi c_\theta c_\psi + c_\varphi s_\psi + s_\theta^2 c_\psi c_\theta^{-1} s_\varphi), \quad (\text{C.21})$$

of:

$$s_\varphi(-ac_\theta s_\psi - as_\theta^2 s_\psi c_\theta^{-1} - bc_\theta c_\psi - bs_\theta^2 c_\psi c_\theta^{-1}) = c_\varphi(-ac_\psi + bs_\psi), \quad (C.22)$$

of:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\varphi &= \frac{c_\varphi(-ac_\psi + bs_\psi)}{-ac_\theta s_\psi - as_\theta^2 s_\psi c_\theta^{-1} - bc_\theta c_\psi - bs_\theta^2 c_\psi c_\theta^{-1}}, \\ &= \frac{-ac_\psi c_\theta + bs_\psi c_\theta}{-as_\psi - bc_\psi}. \end{aligned} \quad (C.23)$$

Een twee-assige magnetische sensor meet enkel  $B_x^{\text{voorwerp}}$  en  $B_y^{\text{voorwerp}}$ . Bijgevolg zijn enkel de eerste twee vergelijkingen van (C.18) bruikbaar om  $\varphi$  te berekenen. In dat geval geldt:

$$a = B_x^{\text{voorwerp}} + s_\theta c_\psi B_z^{\text{vast}} = (s_\varphi c_\theta c_\psi + c_\varphi s_\psi) B_y^{\text{vast}}, \quad (C.24)$$

$$b = B_y^{\text{voorwerp}} - s_\theta s_\psi B_z^{\text{vast}} = (-s_\varphi c_\theta s_\psi + c_\varphi c_\psi) B_y^{\text{vast}}. \quad (C.25)$$

Dit resulteert in:

$$a((-s_\varphi c_\theta s_\psi + c_\varphi c_\psi) B_y^{\text{vast}}) = b((s_\varphi c_\theta c_\psi + c_\varphi s_\psi) B_y^{\text{vast}}), \quad (C.26)$$

of:

$$s_\varphi(-ac_\theta s_\psi - bc_\theta c_\psi) = c_\varphi(-ac_\psi + bs_\psi), \quad (C.27)$$

of:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{-ac_\psi + bs_\psi}{-ac_\theta s_\psi - bc_\theta c_\psi}. \quad (C.28)$$

Merk op dat voor de berekening van a en b de grootte van het aardmagnetisch veld in de z-richting gekend moet zijn.

## C.2.2 Formules voor de foutenvoortplanting bij een twee-assige magnetische sensor

Voor de eenvoud wordt een twee-assige magnetische sensor beschouwd, die in een horizontaal vlak ligt. De hoek  $\varphi$  is dan te berekenen met:

$$\varphi = \operatorname{bgtg}\left(\frac{B_x^{\text{voorwerp}}}{B_y^{\text{voorwerp}}}\right). \quad (C.29)$$

Voor de spreiding op deze hoek geldt:

$$\begin{aligned} \sigma_\varphi^2 &= \left(\frac{\delta f}{\delta B_x^{\text{voorwerp}}}\right)^2 \sigma_{B_x^{\text{voorwerp}}}^2 + \left(\frac{\delta f}{\delta B_y^{\text{voorwerp}}}\right)^2 \sigma_{B_y^{\text{voorwerp}}}^2, \\ &= \left(\left(\frac{\delta f}{\delta B_x^{\text{voorwerp}}}\right)^2 + \left(\frac{\delta f}{\delta B_y^{\text{voorwerp}}}\right)^2\right) \sigma_{B_i^{\text{voorwerp}}}^2, \\ &= \frac{\sigma_{B_i^{\text{voorwerp}}}^2}{(B_x^{\text{voorwerp}})^2 + (B_y^{\text{voorwerp}})^2}, \end{aligned} \quad (C.30)$$

of:

$$\sigma_\varphi = \frac{\sigma_{B_i^{\text{voorwerp}}}}{\sqrt{(B_x^{\text{voorwerp}})^2 + (B_y^{\text{voorwerp}})^2}}. \quad (C.31)$$

### C.3 Meetprincipe op basis van de hoeksnelheid

#### C.3.1 Formules voor het verband tussen Euler-hoeken en projectie van de ogenblikkelijke rotatievector

De tijdsafgeleiden van de ZYZ-Eulerhoeken zijn verschillend van de hoeksnelheden die een gyroscoop meet. De gyroscoop is immers vastgemaakt aan het voorwerp en meet de hoeksnelheden in het voorwerp-assenstelsel. Tussen beide bestaat er een verband, dat in deze paragraaf afgeleid wordt.

De afgeleide  $\dot{\varphi}$  genereert een ogenblikkelijke rotatievector volgens de z-as van het vast assenstelsel en heeft dus de richting  $[0 \ 0 \ 1]^T$ . De afgeleide  $\dot{\theta}$  zorgt voor een ogenblikkelijke rotatievector rond de y-as van het gerooteerd assenstelsel  $\{a\}$ <sup>1</sup>. Deze wijst in de richting  $[-s_\varphi \ c_\varphi \ 0]^T$ . De afgeleide  $\dot{\psi}$  heeft een ogenblikkelijke rotatievector volgens de z-as van het assenstelsel  $\{b\}$ . Deze as ligt volgens  $[c_\varphi s_\theta \ s_\varphi s_\theta \ c_\theta]^T$ . Wanneer deze drie ogenblikkelijke rotatievectoren bij elkaar opgeteld worden, bekomt men:

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}_{vast} = \begin{bmatrix} 0 & -s_\varphi & c_\varphi s_\theta \\ 0 & c_\varphi & s_\varphi s_\theta \\ 1 & 0 & c_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}. \quad (C.32)$$

Deze ogenblikkelijke rotatievector kan ook uitgedrukt worden in het voorwerp-assenstelsel door gebruik te maken van (B.1). Hiervoor geldt:

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}_{voorwerp} = R_{ZYZ}^T \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}_{vast}. \quad (C.33)$$

#### C.3.2 Formules voor de fouten voortplanting bij enkelvoudige integratie

Voor de integratie van de hoekversnelling  $\dot{\theta}_i$  naar de hoek  $\theta$  geldt:

$$\theta_n = \sum (\dot{\theta}_i \Delta t) + \theta_0. \quad (C.34)$$

Een systematische fout plant zich voort volgens

$$\theta_n + \Delta\theta_n = \sum (\dot{\theta}_i + \Delta\dot{\theta}_i) \Delta t + \theta_0. \quad (C.35)$$

Door (C.34) te combineren met (C.35) bekomt men:

$$\begin{aligned} \Delta\theta_n &= \Delta t \sum \Delta\dot{\theta}_i, \\ &= n \Delta t \Delta\dot{\theta}, \\ &= t \Delta\dot{\theta}. \end{aligned} \quad (C.36)$$

<sup>1</sup> Assenstelsels  $\{a\}$  en  $\{b\}$  zijn gedefinieerd in Bijlage B

Voor een toevallige fout geldt:

$$\begin{aligned}
 \sigma(\theta_n) &= \sigma(\sum \dot{\theta}_i \Delta t + \theta_0), \\
 &= \Delta t \sum \sigma(\dot{\theta}_i) + \sigma(\theta_0), \\
 &= n \Delta t \sigma(\dot{\theta}) + \sigma(\theta_0).
 \end{aligned}
 \tag{C.37}$$

## C.4 Meetprincipe op basis van de hoekversnelling

### C.4.1 Formule voor dubbele integratie

De berekeningen beperken zich tot een beweging in een vlak. De formules herleiden zich dan tot:

$$\begin{aligned}
 \theta_n &= \sum (\dot{\theta}_i \Delta t) + \theta_0, \\
 &= \sum ((\sum \ddot{\theta}_i \Delta t + \dot{\theta}_0) \Delta t) + \theta_0, \\
 &= \Delta t^2 \sum \sum \ddot{\theta}_j + n \Delta t \dot{\theta}_0 + \theta_0.
 \end{aligned}
 \tag{C.38}$$

### C.4.2 Formules voor foutenvoortplanting

Voor een systematische fout op  $\ddot{\theta}_j$  geldt:

$$\theta_n + \Delta \theta_n = \Delta t^2 \sum \sum (\ddot{\theta}_j + \Delta \ddot{\theta}_j) + n \Delta t \dot{\theta}_0 + \theta_0.
 \tag{C.39}$$

Rekening houdend met (C.38) geeft dit:

$$\begin{aligned}
 \Delta \theta_n &= \Delta t^2 \sum \sum \Delta \ddot{\theta}_j, \\
 &= \Delta t^2 n^2 \Delta \ddot{\theta}, \\
 &= t^2 \Delta \ddot{\theta}.
 \end{aligned}
 \tag{C.40}$$

Voor een toevallige fout op  $\ddot{\theta}_j$  geldt:

$$\begin{aligned}
 \sigma(\theta_n) &= \sigma(\Delta t^2 \sum \sum \ddot{\theta}_j + n \Delta t \dot{\theta}_0 + \theta_0), \\
 &= \Delta t^2 \sigma(\sum \sum \ddot{\theta}_j), \\
 &= \Delta t^2 \frac{n(n+1)}{2} \sigma(\ddot{\theta}).
 \end{aligned}
 \tag{C.41}$$

Indien  $n$  groot is, dan is  $n^2 \gg n$  en vereenvoudigt de formule tot:

$$\sigma(\theta_n) = \frac{\Delta t^2 n^2}{2} \sigma(\ddot{\theta}) = \frac{t^2}{2} \sigma(\ddot{\theta}).
 \tag{C.42}$$





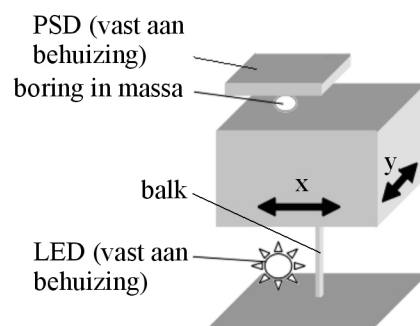
## Bijlage D

# Optische accelerometer

*De optische accelerometer [118] is een twee-assige accelerometer, die speciaal ontworpen is voor het meten van de zwaartekracht. De vooropgestelde specificaties voor het eerste prototype zijn een meetbereik van minstens 1g, een frequentiebereik van 10Hz en een volume van 1cm<sup>3</sup>. Hierbij dient de resolutie zo hoog mogelijk te zijn.*

### D.1 Principe

Figuur D.1 toont het principe van de optische accelerometer. Centraal staat een massa die verend opgehangen is aan een balk. Onder invloed van de inertiële krachten plooit deze balk door en verplaatst de massa. Deze verplaatsing wordt optisch gemeten met een PSD en een LED, die vastgemaakt zijn aan de behuizing van de sensor. Het licht van de LED schijnt door een boring in de massa en creeert een lichtspot op de PSD. De PSD (S4744 van Hamamatsu) meet de positie van deze lichtspot in twee richtingen met een resolutie van 0.1 $\mu$ m.



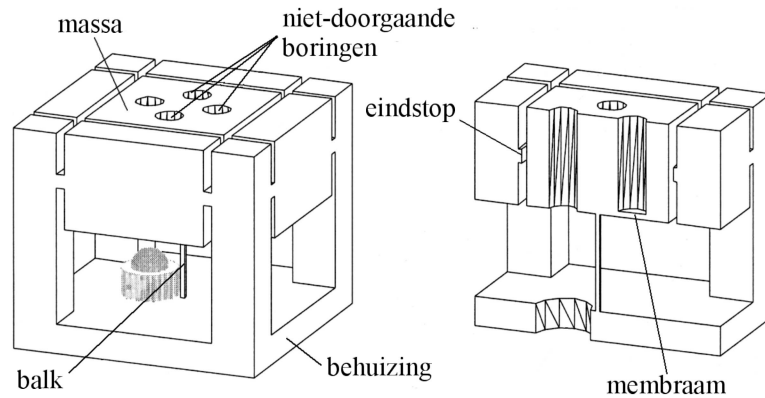
Figuur D.1: Principe van de twee-assige optische accelerometer.

## D.2 Ontwerp

Het ontwerp van deze structuur start met de optimalisatie van de massa en de balk. Hierbij is gestreefd naar een maximale verplaatsing van de massa, zonder dat de balk plastisch vervormt. De voornaamste beperkingen voor deze optimalisatie zijn het beschikbare volume en de resonantiefrequentie. Deze resonantiefrequentie is vastgelegd op 100Hz, zodat het frequentiebereik van de sensor 10Hz bedraagt. De optimalisatie resulteert in een massa van 5.3mm x 5.3mm x 3.5mm en een balk van 3.45mm x 0.165mm x 0.165mm.

In de massa zit een boring om het licht van de LED door te laten. Deze boring verstoort de symmetrie van de sensor. Daarom worden er drie extra boringen voorzien, waardoor het zwaartepunt terug in het midden van de massa komt. Het zijn blinde boringen met een membraan onderaan zodat er geen bijkomende lichtspots op de PSD ontstaan.

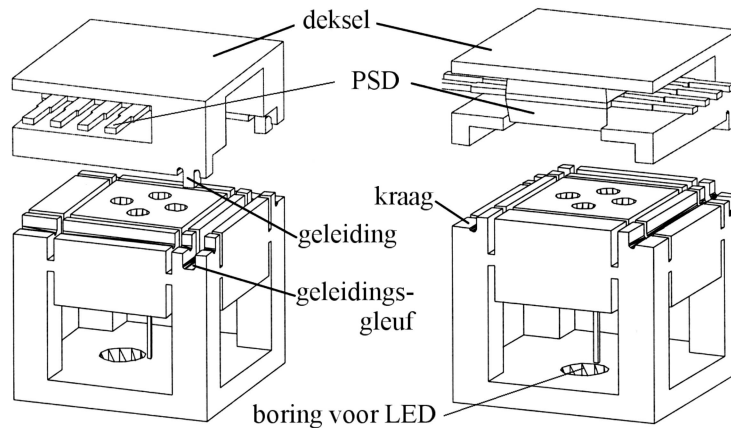
Na de optimalisatie van de basisstructuur, wordt deze geïntegreerd in een behuizing. Tegelijkertijd worden er ook eindstoppen voorzien, die de sensor beschermen tegen overbelasting. Deze eindstoppen limiteren de beweging van de massa tot  $170\mu\text{m}$ , waardoor de balk nooit plastisch kan vervormen. Omwille van deze kleine speling, moet de positionering van de massa ten opzichte van de behuizing zeer nauwkeurig zijn. Daarom vormen de basisstructuur en de behuizing één monolithisch geheel. Figuur D.2 toont de basisstructuur samen met de eindstoppen en de behuizing. De afmetingen bedragen 9mm x 9mm x 8mm.



Figuur D.2: Integratie van de behuizing en de eindstoppen.

Als laatste stap worden de elektronische componenten (LED en PSD) in de behuizing geïntegreerd. Figuur D.3 toont deze integratie. De onderkant van de behuizing is voorzien van een boring om de LED te positioneren alvorens hem vast te lijmen. De PSD is gemonteerd in een extra deksel boven de massa. Hierbij zijn twee translatievrijheidsgraden voor de PSD voorzien, zodat de PSD tijdens montage uitgelijnd kan worden ten opzichte van de boring in de massa. Een eerste vrijheidsgraad is voorzien

tussen de PSD en het deksel. De tweede vrijheidsgraad bestaat uit een geleiding tussen het deksel en de behuizing. Verder is een kraag op de behuizing voorzien om te vermijden dat bij het vastlijmen van het deksel overtollige lijm tussen de massa en de behuizing komt.



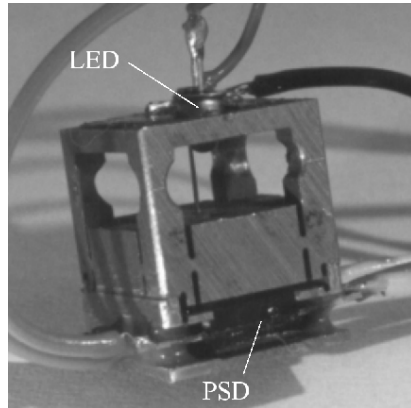
Figuur D.3: Integratie van de optische componenten.

## D.3 Productie

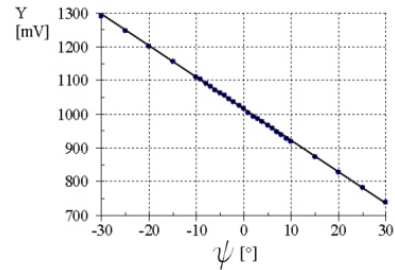
Om de complexe drie-dimensionale structuur van de sensor te maken, wordt gebruik gemaakt van draadvonkerosie en micro-vonkerosie [109, 110]. Deze niet-conventionele bewerkingstechnieken verwijderen materiaal door de erosieve impact van elektrische ontladingen tussen werkstuk en elektrode. Deze ontladingen ontstaan ten gevolge van een aangelegde spanning tussen beide onderdelen. Bij het micro-vonken zijn de ontladingen frequenter, maar minder sterk, waardoor een betere oppervlakte-kwaliteit gehaald wordt. Draadvonkerosie wordt bijgevolg gebruikt voor de ruwe structuur, terwijl micro-vonkerosie gebruikt is voor de kritische onderdelen, zoals de balk en de eindstoppen. Figuur D.4 toont de uiteindelijke sensor. De afmetingen (zonder de kabels) bedragen 9mm x 9mm x 11.5mm.

## D.4 Testen

Om de eigenschappen van de optische accelerometer te bepalen, is de sensor vergeleken met een externe referentie. Deze externe referentie plaatst de sensor in een gekende oriëntatie volgens de ZYZ-Euler conventie. Hierbij ligt de balk van de accelerometer volgens de z-as van het Euler-assenstelsel. De nauwkeurigheid van de



Figuur D.4: Foto van de optische twee-assige accelerometer.



Figuur D.5: Signaal i.f.v. de spinhoek met de elevatiehoek ingesteld op  $90^\circ$ .

externe referentie bedraagt  $0.1^\circ$ . Met deze testopstelling zijn er twee statische proeven uitgevoerd.

Bij de eerste proef is de elevatiehoek  $\theta$  ingesteld op  $90^\circ$ , terwijl de spinhoek  $\psi$  varieert tussen  $-30^\circ$  en  $30^\circ$ . Figuur D.5 toont het signaal van de horizontale as in functie van de hoekverdraaiing  $\psi$ . Rond  $0^\circ$  is een linearisatie van het sinus-verband tussen signaal en spinhoek  $\psi$  mogelijk. De kleinste-kwadratenrechte heeft een helling van  $9.35\text{mV}/^\circ$ . Daar de ruis op het signaal  $1\text{mV}$  bedraagt, is de resolutie rond  $0^\circ$  gelijk aan  $0.1^\circ$ . Dit komt overeen met een resolutie van  $0.02\text{m/s}^2$  of  $0.002g$ .

In de tweede proef variëren beide hoeken  $\theta$  en  $\psi$  binnen bepaalde grenzen. Tabel D.1 toont de maximale fouten op de meting van beide hoeken. Merk op dat deze fouten door het niet-lineaire verband tussen de hoeken en de signalen vergroten als het bereik vergroot.

Tabel D.1: Fout op de hoeken  $\theta$  en  $\psi$ .

Bereik	min. fout $\psi$	max. fout $\psi$	min. fout $\theta$	max. fout $\theta$
$-50^\circ \dots 50^\circ$	$-1.3^\circ$	$1.0^\circ$	$-2.6^\circ$	$2.0^\circ$
$-40^\circ \dots 40^\circ$	$-0.9^\circ$	$1.0^\circ$	$-1.5^\circ$	$2.0^\circ$
$-30^\circ \dots 30^\circ$	$-0.0^\circ$	$1.0^\circ$	$-1.3^\circ$	$2.0^\circ$

Uit deze twee testen blijkt dat er een groot verschil tussen de resolutie en de nauwkeurigheid bestaat. Dit verschil wordt veroorzaakt door de hoge kruisgevoeligheid tussen de beide assen van de PSD. Door deze mee te modelleren of door gebruik te maken van een foutcorrectietabel kan deze fout verder verminderd worden.

## D.5 Vergelijking met de commercieel beschikbare accelerometer ADXL202

Het eerste onderscheid tussen de ontwikkelde optische accelerometer en de commercieel beschikbare accelerometer ADXL202 kan gemaakt worden op basis van het productieproces. De optische accelerometer is gemaakt met behulp van vonkerosie, terwijl de ADXL202 gebaseerd is op het oppervlakte-microbewerken van silicium wafers. Hieruit volgen direct enkele bemerkingsen:

- Vonkerosie is een traag productieproces, dat elk onderdeel stuk per stuk maakt. Daarentegen laat het oppervlakte-microbewerken van silicium wafers toe om grote aantallen sensoren gelijktijdig te maken. Voor grote aantallen zal de kostprijs van een gevonkte structuur dus steeds beduidend hoger liggen dan een oppervlakte-microgeproduceerde structuur.
- De mogelijke graad van miniaturisatie is lager bij vonkerosie dan bij het oppervlakte-microbewerken van silicium. De minimale breedte van een gleuf bij vonkerosie is immers minstens tweemaal de vonkspleet - dit is de afstand tussen werkstuk en elektrode - bedraagt. Deze vonkspleet bedraagt typisch  $5\mu\text{m}$ . Bovendien is de oppervlakte-kwaliteit bij vonkerosie beperkt, waardoor scheurvorming in de dunne balken kan optreden.
- Bij vonkerosie ontbreekt de mogelijkheid om de signaalconditionering en de digitalisering te integreren met de structuur.

Buiten deze nadelen gebaseerd op het productieproces, is de ADXL202 reeds commercieel verkrijgbaar, terwijl de optische sensor verder ontwikkeld moet worden. Daarom is er geopteerd voor de ADXL202 als twee-assige accelerometer in het prototype van een schrijvende computerpen.



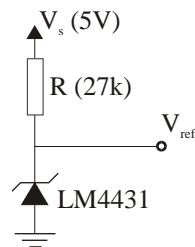
## Bijlage E

# Elektrisch schema van prototype

*De elektronica van het ontwikkelde prototype bevat de signaalconditionering van alle sensoren. Deze bijlage geeft de elektrische schema's van deze signaalconditionering.*

### E.1 Voeding en referentiespanning

De sensoren en hun bijhorende elektronica worden op +5V gevoed met behulp van een externe spanningsbron. Omdat de sensoren zowel een negatieve als een positieve grootte zouden kunnen meten, zijn alle signalen rond een referentiespanning van 2.5V gedefinieerd. Deze spanning wordt intern gegenereerd met behulp van de schakeling getoond in figuur E.1.

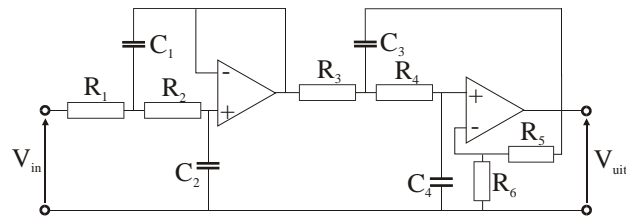


Figuur E.1: Elektrisch schema voor het genereren van de referentiespanning.

### E.2 Elektrisch schema voor de ADXL202

Figuur E.2 toont het elektrische schema van de signaalconditionering voor de accelerometer ADXL202. Bijhorende waarden voor de weerstanden, capaciteiten en ope-

rationele versterker zijn weergegeven in tabel E.1. Deze signaalconditionering is in paragraaf 3.3.3 besproken .



Figuur E.2: Elektrisch schema voor de accelerometer ADXL202.

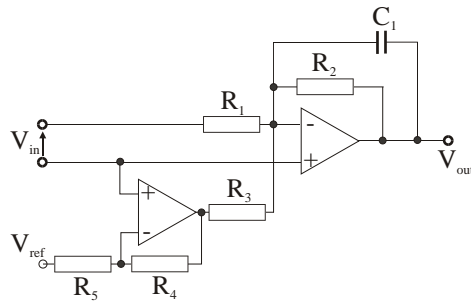
Tabel E.1: Weerstanden en capaciteiten bij de schakeling in figuur E.2.

$R_1$	13.7k $\Omega$
$R_2$	69.8k $\Omega$
$R_3$	17.4k $\Omega$
$R_4$	53.6k $\Omega$
$R_5$	10k $\Omega$
$R_6$	10k $\Omega$
$C_1$	47nF
$C_2$	22nF
$C_3$	47nF
$C_4$	22nF
operationele versterker	OP284



### E.3 Elektrisch schema voor de HMC1022

Figuur E.3 toont het elektrische schema van de signaalconditionering voor de magnetische sensor HMC1022. Bijhorende waarden voor de weerstanden, capaciteiten en versterker zijn weergegeven in tabel E.2. Deze signaalconditionering is in paragraaf 3.3.3 besproken.



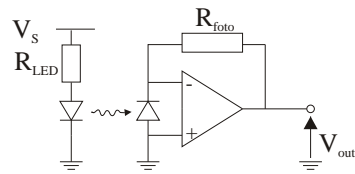
Figuur E.3: Elektrisch schema voor de magnetische sensor HMC1022.

Tabel E.2: Weerstanden en capaciteiten bij de schakeling in figuur E.3.

$R_1$	$270\Omega$
$R_2$	$100k\Omega$
$R_3$	$11k\Omega$
$R_4$	$11k\Omega$
$R_5$	$100k\Omega$
$C_1$	$15nF$
operationele versterker	AMP04508

### E.4 Elektrisch schema voor de optische krachtsensor

Figuur E.4 toont het elektrische schema van de signaalconditionering voor de optische krachtsensor. De bijhorende weerstanden  $R_{LED}$  en  $R_{foto}$  zijn respectievelijk  $300\Omega$  en  $1M\Omega$ . Het type van de operationele versterker is AD8542. Deze signaalconditionering is in paragraaf 4.4.2 besproken.



Figuur E.4: Elektrisch schema voor de optische krachtsensor.

## Bijlage F

# IJking van de kalibratiestand voor de oriëntatiesensor

*In hoofdstuk 3 is een kalibratiestand ontwikkeld om de oriëntatiesensor te kalibreren. Deze bijlage gaat dieper in op de ijking van deze kalibratiestand.*

### F.1 Bijregelen van de elevatie-as en de spin-as

Na montage van de kalibratiestand wordt de relatieve positie van de elevatie-as en de spin-as ten opzichte van de azimuth-as bijgesteld zodanig dat:

- de drie assen elkaar in één punt snijden,
- de drie assen loodrecht op elkaar staan.

De ligging van de drie assen wordt gemeten met behulp van een 3D coördinaatmeetmachine. Hiervoor wordt de volgende procedure gebruikt:

1. Zet de kalibratiestand waterpas op de 3D coördinaatmeetmachine.
2. Bepaal de ligging van de azimuth-as door de zijwand van het roterend tafelblad op te meten. Deze zijwand wordt immers als lagering gebruikt, waardoor de azimuth-as door het middelpunt van deze cilindervormige zijwand gaat. Doordat de kalibratiestand waterpas staat, is de richting van de azimuth-as verticaal.
3. Bepaal de ligging van de spin-as door de positie van zijn lagers op te meten. De spin-as wordt hiervoor tijdelijk gedemonteerd.
4. Bepaal onrechtstreeks de ligging van de elevatie-as door deze as 180° te draaien en de ligging van de spin-as opnieuw te meten. Op basis van beide metingen kan de ligging van de elevatie-as berekend worden.
5. Bepaal de kortste afstand tussen de drie assen en de loodrechtheid van deze assen. Indien deze afwijkingen te groot zijn, regel de elevatie-as en de spin-as bij en begin terug met stap 2.

Na kalibratie bedraagt de afwijking van de loodrechtheid tussen azimuth-as en elevaties-as  $0.02^\circ$  en tussen de elevatie-as en de spin-as  $0.01^\circ$ . De minimale afstand tussen de elevatie-as en de spin-as bedraagt  $3\mu\text{m}$ , terwijl de minimale afstand tussen de azimuth-as en beide andere assen  $70\mu\text{m}$  bedraagt.

## F.2 Waterpas zetten van de kalibratiestand

De kalibratiestand staat waterpas indien de azimuth-as verticaal staat. De azimuth-as is gedefinieerd als de loodlijn op het vlak door de drie lagerpunten van het roterend tafelblad. De richting van de azimuth-as kan aangepast worden door de poten van de vlaktafel, waarop de kalibratiestand staat, in hoogte bij te regelen.

Om de richting van de azimuth-as te meten, wordt een elektronische waterpas (nauwkeurigheid  $0.001^\circ$ ) bovenop het roterend tafelblad geplaatst. Deze waterpas meet echter niet alleen de scheefstelling van de drie lagerpunten, maar ook de niet-evenwijdigheid van boven- en ondervlak van het roterend tafelblad en het niet vlak zijn van de onderkant van het roterend tafelblad. Daarom wordt de scheefstelling van het roterend tafelblad bij 24 azimuth-hoeken gemeten (om de  $15^\circ$ ). Uit deze 24 metingen wordt vervolgens de scheefstelling van de azimuth-as berekend.

Alvorens de formules voor het berekenen van de scheefstelling uit deze 24 metingen af te leiden, worden er eerst enkele begrippen gedefinieerd:

- Het  $\{xyz\}$ -assenstelsel is een vast-assenstelsel, waarin de z-as evenwijdig is met de zwaartekracht. Dit is de ideale oriëntatie voor de kalibratiestand.
- Het  $\{x'y'z'\}$ -assenstelsel is een vast assenstelsel, gedefinieerd door de drie steunpunten waarop het roterend tafelblad rust. Hierbij is de  $z'$ -as de azimuth-as.
- Het  $\{x''y''z''\}$ -assenstelsel is het roterend assenstelsel vastgemaakt aan de onderkant van het roterend tafelblad. Hierbij is de  $x''$ -as evenwijdig met de elektronische waterpas.
- De hoeken  $\theta_e, \psi_e, \varphi_e$  zijn de RPY-hoeken die scheefstelling tussen het  $\{xyz\}$ -assenstelsel en  $\{x'y'z'\}$ -assenstelsel weergeven. De hoek  $\varphi_e$  is gelijk aan  $0^\circ$  door de nulstelling van de encoder.

Stel dat de elektronische waterpas een scheefstelling  $\alpha_{waterpas}$  meet. Deze meting bestaat uit de som van de scheefstelling van de  $x''$ -as (de hoek  $\theta_{x''}$ ) en een offset  $\alpha_0$  op de meting veroorzaakt door de niet-evenwijdigheid van boven- en ondervlak en een offset op elektronische waterpas.

Bij een volmaakt vlakke onderzijde van het roterend tafelblad is de  $x''$ -as in het  $\{x'y'z'\}$ -assenstelsel voor te stellen als een ronddraaiende vector  $[c_\varphi \ s_\varphi \ 0]^T$ , met  $\varphi$  de rotatie van het roterend tafelblad. Deze vector is in het  $\{xyz\}$ -assenstelsel voor te stellen als:

$$(x'' - as)_{xyz} = R_{RPY}[c_\varphi s_\varphi 0]^T = \begin{bmatrix} \theta_e c_\varphi + s_{\theta_e} s_{\psi_e} s_\varphi \\ c_{\psi_e} s_\varphi \\ -s_{\theta_e} c_\varphi + c_{\theta_e} s_{\psi_e} s_\varphi \end{bmatrix}. \quad (\text{F.1})$$

De hoek van deze vector met het horizontale xy-vlak is gelijk aan:

$$\theta_e = \text{bgsin} \frac{-s_{\theta_e} c_{\varphi} + c_{\theta_e} s_{\psi_e} s_{\varphi}}{1}. \quad (\text{F.2})$$

Daar deze hoek klein is en de uitlijningsfouten eveneens klein zijn, kan deze formule vereenvoudigd worden tot:

$$\theta_e = -\theta_e c_{\varphi} + \psi_e s_{\varphi}. \quad (\text{F.3})$$

De scheefstelling  $\alpha_{waterpas}$  is bijgevolg voor te stellen als:

$$\alpha_{waterpas} = -\theta_e c_{\varphi} + \psi_e s_{\varphi} + \alpha_0. \quad (\text{F.4})$$

Hieruit kan de offset  $\alpha_0$  en de scheefstelling  $\theta_e$  en  $\psi_e$  berekend worden volgens:

$$[\theta_e \ \psi_e \ \alpha_0] = \alpha_{waterpas} / [-c_{\varphi} \ s_{\varphi} \ 1]^T. \quad (\text{F.5})$$

Zoals eerder vermeld is deze relatie enkel geldig indien het ondervlak van het roterend tafelblad perfect vlak is. Indien dit niet het geval is, kan de scheefstelling toch met deze formule berekend worden indien een groot aantal verschillende standen van het roterend tafelblad beschouwd worden. Het niet vlak zijn van de onderzijde zorgt dan voor een random fout op  $\alpha_{waterpas}$ .

Na de bijregeling van de scheefstelling wordt een nauwkeurigheid van  $\theta_e = 0.001^\circ$  en  $\psi_e = 0.0008^\circ$  bekomen.



## Bijlage G

# Software voor reconstructie van tekst

*Deze appendix bevat het Matlab-programma voor het reconstrueren van een tekst.*

### G.1 Hoofdprogramma

```
function nothing=reconstruct(filenaam)

% =====
% functie
% naam:      reconstruct
% doel:      Reconstrueren van een pennentrek uit de opgemeten
%            signalen
% parameter: filenaam waarin data zit
% =====

% 1. Data inladen en aantal meetpunten bepalen.
% -----

%file inlezen
data=load(filenaam);           %alle meetdata in Volt
load kalibratiedata.mat;      %bevat de kalibratie van
% - de ADXL202 (X_accelero)
% - de HMC1022 (X_magn)
% - de krachtsensor
%   (R_kracht2signaal)
```

```

%instellen samplefrequentie
    samplefrequentie=1000;                                %in Hz

%juiste kanalen selecteren
    signaal_fy_origineel=data(:,1)';                    %in Volt
    signaal_fz_origineel=data(:,2)';                    %in Volt
    signaal_fx_origineel=data(:,3)';                    %in Volt
    signaal_ax_origineel=-data(:,5)';                    %in Volt
    signaal_ay_origineel=-data(:,4)';                    %in Volt
    signaal_Mx_origineel=data(:,6)';                    %in Volt
    signaal_My_origineel=-data(:,7)';                    %in Volt

%aantal punten bepalen
    aantal_punten=max(size(data));

% 2. Filteren signalen
%-----

% filter ontwerp: butterworth, 1e orde, 100Hz
    [B,A]=butter(4,20/samplefrequentie);

% filteren signalen
    signaal_fx_sensor=filtfilt(B,A,signaal_fx_origineel);
    signaal_fy_sensor=filtfilt(B,A,signaal_fy_origineel);
    signaal_fz_sensor=filtfilt(B,A,signaal_fz_origineel);
    signaal_ax_sensor=filtfilt(B,A,signaal_ax_origineel);
    signaal_ay_sensor=filtfilt(B,A,signaal_ay_origineel);
    signaal_Mx_sensor=filtfilt(B,A,signaal_Mx_origineel);
    signaal_My_sensor=filtfilt(B,A,signaal_My_origineel);

% 3. Berekenen hoeken
% -----

[theta_berekend,psi_berekend]
    =ADXL2hoek(X_accelero, signaal_ax_sensor, signaal_ay_sensor);

[phi_berekend,phi_nt_comp]
    =HMC2hoek(X_magn, signaal_Mx_sensor, signaal_My_sensor,
    theta_berekend, psi_berekend);

```



```

% 4. Verwijderen offset op krachtsignaal door eigengewicht pen
% -----

for i=1:aantal_punten
    R_Euler
        =ZYZEuler2R(phi_berekend(i), theta_berekend(i),
            psi_berekend(i));
    f_richting=R_Euler'*[0;0;-1];
    fx_offset(i)=f_richting(1)*(-0.0108);    %in Volt
    fy_offset(i)=f_richting(2)*(-0.0063);    %in Volt
    fz_offset(i)=f_richting(3)*(-0.0156);    %in Volt
end
signaal_fx_met_drift=signaal_fx_sensor-fx_offset;    %in Volt
signaal_fy_met_drift=signaal_fy_sensor-fy_offset;    %in Volt
signaal_fz_met_drift=signaal_fz_sensor-fz_offset;    %in Volt

% 5. Compenseren drift op de krachtsensor
% -----

% 5.1. Verwijderen constante offset (beginwaarde van signaal
% gedurende 0.1s) van signaal.

    signaal_fx_offsetloos
        =signaal_fx_met_drift-mean(signaal_fx_met_drift(1:100));
    signaal_fy_offsetloos
        =signaal_fy_met_drift-mean(signaal_fy_met_drift(1:100));
    signaal_fz_offsetloos
        =signaal_fz_met_drift-mean(signaal_fz_met_drift(1:100));

% 5.2. Berekening begin en einde pennentrek

% Fz_pen is steeds positief als de pen het papier raakt
% (een trekkracht in de langsrichting van de pen is niet
% mogelijk. Aangezien gevoeligheid van deze as negatief is,
% zal signaal_fz_offsetloos negatief zijn als pen papier raakt
    ondergrens_kracht=0.3*(-0.1409);    %in Volt
    veiligheid=200;
    i=veiligheid+1;
    while i<aantal_punten-veiligheid
        i=i+1;
        if signaal_fz_offsetloos(i)<ondergrens_kracht
            beginindex_ondergrens_kracht=i-1-veiligheid;
            while i<aantal_punten-veiligheid
                i=i+1;

```

```

        if signaal_fz_offsetloos(i)>ondergrens_kracht
            eindindex_ondergrens_kracht=i+veiligheid;
            i=aantal_punten;
        end
    end
end
end
end

% 5.3. Verwijderen van de drift met 1e orde polynoom

%parameters
    orde_fit=1;
    min_tussen_strokes=300;

% vectoren declareren
    signaal_fx=zeros(1,aantal_punten);
    signaal_fy=zeros(1,aantal_punten);
    signaal_fz=zeros(1,aantal_punten);

% begin woord en eind woord
    start=beginindex_ondergrens_kracht;
    eind=eindindex_ondergrens_kracht;

%aanmaken tijdsvector
    tijd=[start-min_tussen_strokes:eind+min_tussen_strokes]
        *samplefrequentie;
    tijd_nul_f(1:min_tussen_strokes+1)
        =[start-min_tussen_strokes:start]*samplefrequentie;
    tijd_nul_f(min_tussen_strokes+2:2*min_tussen_strokes+2)
        =[eind:eind+min_tussen_strokes]*samplefrequentie;

% verwijderen van drift op signaal fx
    signaal_nul_fx(1:min_tussen_strokes+1)
        =signaal_fx_offsetloos(start-min_tussen_strokes:start);
    signaal_nul_fx(min_tussen_strokes+2:2*min_tussen_strokes+2)
        =signaal_fx_offsetloos(eind:eind+min_tussen_strokes);
    [P_x,S_x]=POLYFIT(tijd_nul_f, signaal_nul_fx, orde_fit);
    drift_signaal_fx=polyval(P_x, tijd);
    signaal_fx(start-min_tussen_strokes:eind+min_tussen_strokes)
        =signaal_fx_offsetloos(start-min_tussen_strokes:
            eind+min_tussen_strokes)-drift_signaal_fx;

% verwijderen van drift op signaal fy
    signaal_nul_fy(1:min_tussen_strokes+1)
        =signaal_fy_offsetloos(start-min_tussen_strokes:start);

```

```

    signaal_nul_fy(min_tussen_strokes+2:2*min_tussen_strokes+2)
        =signaal_fy_offsetloos(eind:eind+min_tussen_strokes);
    [P_y,S_y]=POLYFIT(tijd_nul_f, signaal_nul_fy, orde_fit);
    drift_signaal_fy=polyval(P_y, tijd);
    signaal_fy(start-min_tussen_strokes:eind+min_tussen_strokes)
        =signaal_fy_offsetloos(start-min_tussen_strokes:
            eind+min_tussen_strokes)-drift_signaal_fy;

% verwijderen van drift op signaal fz
    signaal_nul_fz(1:min_tussen_strokes+1)
        =signaal_fz_offsetloos(start-min_tussen_strokes:start);
    signaal_nul_fz(min_tussen_strokes+2:2*min_tussen_strokes+2)
        =signaal_fz_offsetloos(eind:eind+min_tussen_strokes);
    [P_z,S_z]=POLYFIT(tijd_nul_f, signaal_nul_fz, orde_fit);
    drift_signaal_fz=polyval(P_z, tijd);
    signaal_fz(start-min_tussen_strokes:eind+min_tussen_strokes)
        =signaal_fz_offsetloos(start-min_tussen_strokes:
            eind+min_tussen_strokes)-drift_signaal_fz;

% 6. Signalen omzetten naar kracht
% -----

for i=1:aantal_punten
    kracht_pen=inv(R_kracht2signaal)
        *[signaal_fx(i);signaal_fy(i);signaal_fz(i)];
    fx_pen(i)=kracht_pen(1);
    fy_pen(i)=kracht_pen(2);
    fz_pen(i)=kracht_pen(3);
end

% 7. Berekenen krachten in vast assenstelsel
% -----

for i=1:aantal_punten
    R_Euler
        =ZYZEuler2R(phi_berekend(i), theta_berekend(i),
            psi_berekend(i));
    f_vast=R_Euler*[fx_pen(i);fy_pen(i);fz_pen(i)];
    fx_vast(i)=f_vast(1);
    fy_vast(i)=f_vast(2);
    fz_vast(i)=f_vast(3);
end

```

```

% 8. Berekening van de snelheid met wrijvingsmodel
% -----

minimale_fz=0.56; %in N
f_horizontaal=zeros(1,aantal_punten);
f_vertikaal=zeros(1,aantal_punten);
snelheid=zeros(1,aantal_punten);
snelheid_x=zeros(1,aantal_punten);
snelheid_y=zeros(1,aantal_punten);
mu_gemeten=zeros(1,aantal_punten);
mu_norm=zeros(1,aantal_punten);

for i=1:aantal_punten
    f_horizontaal(i)=sqrt(fx_vast(i)^2+fy_vast(i)^2);
    f_vertikaal(i)=fz_vast(i);
    if f_vertikaal(i)<minimale_fz
        % de penpunt duwt te licht tegen het papier om inkt af
        % te geven m.a.w. men zal niets op het papier zien.
        % Daarom mag men hier de snelheid 0 veronderstellen
        snelheid(i)=0;
        snelheid_x(i)=0;
        snelheid_y(i)=0;
    else
        mu_gemeten(i)=abs(f_horizontaal(i)/f_vertikaal(i));
        mu_norm(i)=mu_gemeten(i)*(abs(f_vertikaal(i)))^(1/3);
        snelheid(i)=900.918*mu_norm(i)^3+31.371*mu_norm(i)^2
            +68.703*mu_norm(i)+0.039;
        snelheid_x(i)=-sign(fx_vast(i))*snelheid(i)
            *abs(fx_vast(i)/f_horizontaal(i));
        snelheid_y(i)=-sign(fy_vast(i))*snelheid(i)
            *abs(fy_vast(i)/f_horizontaal(i));
    end
end

% 9. Integratie van de snelheid naar positie
% -----

position_x=zeros(1,aantal_punten);
position_y=zeros(1,aantal_punten);
position_x(1)=0;
position_y(1)=0;
for i=2:aantal_punten
    position_x(i)=position_x(i-1)+snelheid_x(i)/samplefrequentie;
    position_y(i)=position_y(i-1)+snelheid_y(i)/samplefrequentie;
end

```

```
end
```

```
% 10. PLOT ZIN
% -----
```

```
figure;plot(position_x, position_y, '.');
grid on;axis('equal');
xlabel('x-axis (mm)');ylabel('y-axis (mm)');
```

```
% einde functie: als uitgang = 0, dan zijn er geen fouten
% opgetreden
nothing=0;
```

## G.2 Hulpprogramma 1: de functie ADXL2hoek

```
function [theta, psi]=ADXL2hoek(X, signaal_ax_sensor,
                                signaal_ay_sensor)

% function [theta, psi]=ADXL2hoek(X, signaal_ax_sensor,
%   signaal_ay_sensor)
% met X=[theta_e1 (graden), phi_e1(graden),
%   psi_e1 (graden), gevoeligheid_ax (V/g),
%   gevoeligheid_ay (V/g), offset_ax (V),
%   offset_ay (V)]

%parameters uit X halen
    theta_e1=X(1)/180*pi;           %in rad
    phi_e1=X(2)/180*pi;            %in rad
    psi_e1=X(3)/180*pi;           %in rad
    gevoeligheid_ax=X(4);          %Volt/g
    gevoeligheid_ay=X(5);          %Volt/g
    offset_ax=X(6);                %Volt
    offset_ay=X(7);                %Volt

%aantal punten bepalen
    grootte=size(signaal_ax_sensor);
    aantal_punten=grootte(2);

%uitlijningsfout berekenen
```

```

R_e=RPYangles2R(theta_e1, psi_e1, phi_e1);

%signalen naar versnellingen (in sensor assenkruis)
ax_sensor=(signaal_ax_sensor-offset_ax)./gevoeligheid_ax;
ay_sensor=(signaal_ay_sensor-offset_ay)./gevoeligheid_ay;
gemeten_acceleratie=sqrt(ax_sensor.^2+ay_sensor.^2);
for i=1:aantal_punten
    if gemeten_acceleratie(i)>1
        %Door storingen (o.a. beweging, ruis) op de metingen
        %is de gemeten acceleratie groter dan 1g. Hierdoor
        %worden de berekeningen onstabiel (asin van een
        %getal groter als 1 bestaat niet. Daarom wordt de
        %gemeten_acceleratie afgeknot op 1g
        gemeten_acceleratie(i)=1;
    end
end
az_sensor=-sqrt(1-gemeten_acceleratie.^2);           %in g

%versnellingen (sensor assenkruis) naar versnellingen
%(pen assenkruis)
A_sensor=[ax_sensor;ay_sensor;az_sensor];
A_pen=R_e*A_sensor;
ax_pen=A_pen(1,:);
ay_pen=A_pen(2,:);

%versnellingen naar ZYZ Euler hoeken
theta=zeros(1,aantal_punten);
psi=zeros(1,aantal_punten);
gemeten_acceleratie_pen=zeros(1,aantal_punten);
for i=1:aantal_punten
    gemeten_acceleratie_pen(i)=sqrt(ax_pen(i)^2+ay_pen(i)^2);
    if gemeten_acceleratie_pen(i)>1
        gemeten_acceleratie_pen(i)=1;
    end
    theta(i)=asin(gemeten_acceleratie_pen(i));
    psi(i)=mod(atan2(-ay_pen(i),ax_pen(i)),2*pi);
end

```

### G.3 Hulpprogramma 2: de functie HMC2hoek

```

function [phi,phi_zonder_compensatie]
    =HMC2hoek(X, signaal_Mx_sensor, signaal_My_sensor,
        theta, psi)

```

```

% X=[theta_e1 (graden), phi_e1 (graden), psi_e1 (graden),
%   gevoeligheid_Mx (Volt/hor. magn. veld),
%   gevoeligheid_My (Volt/hor. magn. veld),
%   offset_Mx (Volt), offset_My (Volt),
%   [signaal_Mx_sensor]      in V
%   [signaal_My_sensor]      in V
%   [theta]                  in graden
%   [psi]                    in graden

%parameters uit X halen
parameters=X;
theta_e1=parameters(1)/180*pi;           %rad
phi_e1=parameters(2)/180*pi;            %rad
psi_e1=parameters(3)/180*pi;            %rad
gevoeligheid_Mx=parameters(4);          %Volt/magn. veld
gevoeligheid_My=parameters(5);          %Volt/magn. veld
offset_Mx=parameters(6);                %Volt
offset_My=parameters(7);                %Volt

%aantal punten bepalen
aantal_punten=max(size(signaal_Mx_sensor));

%Magn. veld berekenen
MagnVeldx=-0.44*cos(57*pi/180)*ones(1,aantal_punten);
MagnVeldy=-0.44*sin(57*pi/180)*ones(1,aantal_punten);
MagnVeldz=-0.8205*ones(1,aantal_punten);

%signaal --> magn. veld
Mx_sensor=(signaal_Mx_sensor-offset_Mx)./gevoeligheid_Mx;
My_sensor=(signaal_My_sensor-offset_My)./gevoeligheid_My;

%berekening hoek phi zonder compensatie uitlijning
A=Mx_sensor+MagnVeldz.*sin(theta).*cos(psi);
B=My_sensor-MagnVeldz.*sin(theta).*sin(psi);
teller=A.*cos(theta).*sin(psi).*MagnVeldx
      -A.*cos(psi).*MagnVeldy
      +B.*cos(theta).*cos(psi).*MagnVeldx
      +B.*sin(psi).*MagnVeldy;
noemer=-A.*cos(psi).*MagnVeldx
      -A.*cos(theta).*sin(psi).*MagnVeldy
      +B.*sin(psi).*MagnVeldx
      -B.*cos(theta).*cos(psi).*MagnVeldy;

```

```

phi_zonder_compensatie=mod(atan2(-teller, -noemer),2*pi);

%teken bepalen van Mz_sensor
teken=zeros(1,aantal_punten);
for i=1:aantal_punten
    M_vast=[MagnVeldx(i); MagnVeldy(i); MagnVeldz(i)];

    R_pen2vast
        =ZYZEuler2R(phi_zonder_compensatie(i), theta(i), psi(i));
    Re=RPYangles2R(theta_e1, psi_e1, phi_e1);
    Zas_sensor_in_penstelsel=Re(:,3);
    Zas_sensor_in_vaststelsel=R_pen2vast
        *Zas_sensor_in_penstelsel;

    cosinushoek
        =(Zas_sensor_in_vaststelsel(1)*M_vast(1)
        +Zas_sensor_in_vaststelsel(2)*M_vast(2)
        +Zas_sensor_in_vaststelsel(3)*M_vast(3))
        /((Zas_sensor_in_vaststelsel'
        *Zas_sensor_in_vaststelsel)*(M_vast'*M_vast));
    hoek=acos(cosinushoek);
    teken(i)=sign(pi/2-abs(hoek));
end

%Mz berekenen
Mz_sensor=zeros(1,aantal_punten);
for i=1:aantal_punten
    if (MagnVeldx(i)^2+MagnVeldy(i)^2+MagnVeldz(i)^2
        -(Mx_sensor(i)^2+My_sensor(i)^2))>0

        Mz_sensor(i)
            =teken(i)*sqrt(MagnVeldx(i)^2+MagnVeldy(i)^2
            +MagnVeldz(i)^2
            -(Mx_sensor(i)^2+My_sensor(i)^2));
    else Mz_sensor(i)=0;
    end
end

%sensor --> pen assenkruis
Re=RPYangles2R(theta_e1, psi_e1, phi_e1);
M_sensor=[Mx_sensor;My_sensor;Mz_sensor];
M_pen=Re*M_sensor;
Mx_pen=M_pen(1,:);
My_pen=M_pen(2,:);
%Mz_pen=M_pen(3,:);

```



```

%hoek phi berekenen
A=Mx_pen+MagnVeldz.*sin(theta).*cos(psi);
B=My_pen-MagnVeldz.*sin(theta).*sin(psi);
teller=A.*cos(theta).*sin(psi).*MagnVeldx
        -A.*cos(psi).*MagnVeldy
        +B.*cos(theta).*cos(psi).*MagnVeldx
        +B.*sin(psi).*MagnVeldy;
noemer=-A.*cos(psi).*MagnVeldx
        -A.*cos(theta).*sin(psi).*MagnVeldy
        +B.*sin(psi).*MagnVeldx
        -B.*cos(theta).*cos(psi).*MagnVeldy;
phi=mod(atan2(-teller, -noemer),2*pi);

```

## G.4 Hulpprogramma 3: de functie RPYangles2R

```

function R = RPYangles2R(theta, psi, phi)

%berekent de transformatiematrix vanuit de RPY-hoeken
%theta, psi en phi

R=[
    cos(phi)*cos(theta)
    cos(phi)*sin(theta)*sin(psi)-sin(phi)*cos(psi)
    cos(phi)*sin(theta)*cos(psi)+sin(phi)*sin(psi);

    sin(phi)*cos(theta)
    sin(phi)*sin(theta)*sin(psi)+cos(phi)*cos(psi)
    sin(phi)*sin(theta)*cos(psi)-cos(phi)*sin(psi);

    -sin(theta)
    cos(theta)*sin(psi)
    cos(theta)*cos(psi)
];

```

## G.5 Hulpprogramma 4: de functie ZYZEuler2R

```

function R = ZYZEuler2R(phi, theta, psi)

%berekening van de transformatiematrix op basis van de
%ZYZEulerhoeken

R = [

```

```
cos(phi)*cos(theta)*cos(psi)-sin(phi)*sin(psi)
-cos(phi)*cos(theta)*sin(psi)-sin(phi)*cos(psi)
cos(phi)*sin(theta);

sin(phi)*cos(theta)*cos(psi)+cos(phi)*sin(psi)
-sin(phi)*cos(theta)*sin(psi)+cos(phi)*cos(psi)
sin(phi)*sin(theta);

-sin(theta)*cos(psi)
sin(theta)*sin(psi)
cos(theta)
];
```