

Selectie van actuatoren & sensoren

Citation for published version (APA):

Tackenberg, P. G. H. (1995). *Selectie van actuatoren & sensoren: voor een actieve voertuigvering*. (DCT rapporten; Vol. 1995.128). Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1995

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

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

[Link to publication](#)

General rights

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

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

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

www.tue.nl/taverne

Take down policy

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

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Selectie van Actuatoren & Sensoren
voor een Actieve Voertuigvering

P.G.H. Tackenberg
WFW rapport 95.128

Patrick Tackenberg
Stageverslag
Begeleider: Marc van de Wal
Faculteit Werktuigbouwkunde
Technische Universiteit Eindhoven
September 1995

SAMENVATTING

In dit stageverslag wordt de Ingangs en Uitgangs selectiemethode (IU selectie) uit [7] geëvalueerd en toegepast op een model van een trekker-oplegger combinatie. Bij IU selectie wordt besloten hoeveel, waar en welk type sensoren (ingangen) en actuatoren (uitgangen) er voor de regeling gebruikt worden.

De gebruikte selectiemethode is gebaseerd op een voorwaarde voor robuuste stabiliteit en nominale prestatie. In tegenstelling tot in [7], waar de modelfout voor alle IU sets even groot wordt genomen, is in dit verslag gekozen voor een modelfout die voor elke IU set afzonderlijk uitgerekend wordt. Een nadeel van de methode is dat elke te regelen grootheid door tenminste één meting vertegenwoordigd moet worden in de IU set. Bij het toepassen van de selectiemethode op de trekker-oplegger combinatie blijkt dat niet alle te regelen grootheden vertegenwoordigd kunnen worden door één metingen in de IU sets. Daarom worden de prestatie-eisen maar gebaseerd op een regeldoel: het comfort van de chauffeur.

Tot slot wordt uit de geselecteerde IU sets een aantal subsystemen gekozen waarvoor een regeling ontworpen wordt en een simulatie wordt gedaan. Hetzelfde gebeurt voor een aantal niet- geselecteerde sets. Het blijkt dat het niet gegarandeerd is dat in dit geval de geselecteerde systemen een beter geregeld gedrag hebben dan de niet-geselecteerde.

INHOUD

Samenvatting	i
Notatie	iii
1 Inleiding	1
2 Selectie van actuatoren en sensoren	3
2.1 Achtergronden	3
2.2 Het selectiecriteria	4
3 De toepassing	8
3.1 De trekker-oplegger combinatie	8
3.2 De specificaties voor IU selectie	10
3.3 Resultaten van IU selectie	11
3.4 Het geregelde gedrag	15
4 Conclusies en aanbevelingen	20
Referenties	22
Bijlage 1: Het trekker-oplegger model	23
Bijlage 2: Schalingsafhankelijkheid van S en δ_{ra}	32
Bijlage 3: Het conditiegetal voor geselecteerde IU sets	34
Bijlage 4: Het geregelde gedrag van IU sets	37

NOTATIE

SYMBOLEN

a	scalar
\mathbf{a}	kolom
A	matrix
A^{-1}	inverse matrix
A^T	getransponeerde matrix
$\dot{\mathbf{a}}$	eerste orde afgeleide van \mathbf{a}
$\hat{\mathbf{a}}$	geschatte \mathbf{a}
$\bar{\sigma}(A)$	maximale singuliere waarde van A
$\underline{\sigma}(A)$	minimale singuliere waarde van A
$\ A\ _m$	m norm van a
$\Lambda(A)$	Relative Gain Array van A
$\kappa(A)$	conditiegetal van A

AFKORTINGEN

EDLTI	Eindig Dimensionaal Lineair TijdsInvariant
IU	Ingang en Uitgang
RC	RegelaarConfiguratie
RSO	RegelaarStructuurOntwerp

HOOFDSTUK 1

INLEIDING

Het doel van deze stage is om een methode van *Ingangs en Uitgangsselectie* (IU selectie), ontwikkeld door Reeves [7], te evalueren door deze toe te passen op een model van een trekker-oplegger combinatie. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de in [7] beschreven Matlab Control Configuration Design toolbox [8].

Het ontwerpen van een regelsysteem bestaat uit de volgende stappen [1]:

1. bepalen van de te regelen grootheden en specificaties daarvoor
2. modelleren van het te regelen systeem
3. regelaarstructuurontwerp
4. regelaarontwerp
5. evaluatie van het regelsysteem (simulaties/experimenten)
6. implementatie van de regelaar

In dit verslag wordt hoofdzakelijk naar stap 3, het RegelaarStructuurOntwerp (RSO), gekeken. RSO bestaat uit twee elkaar opvolgende delen en wel de IU selectie en het RegelaarConfiguratie (RC) ontwerp. Aan de mogelijkheid voor het tegelijk uitvoeren van deze twee delen wordt in de literatuur nauwelijks aandacht besteed. In het deel van IU selectie wordt een keuze gemaakt tussen het aantal, de plaats en het soort ingangen ("actuatoren") en uitgangen ("sensoren") die voor de regeling gebruikt worden. Met de uitgangen worden bij IU selectie de gemeten grootheden bedoeld en *niet* de te regelen grootheden die bepaald zijn in de eerste stap. Bij het RC ontwerp, ook wel partitie genoemd, wordt gekeken hoe de geselecteerde uitgangen teruggekoppeld moeten worden naar de ingangen ten behoeve van decentrale regelaars, waarbij niet alle ingangen worden teruggekoppeld naar alle uitgangen. Subsystemen van het systeem worden zo goed mogelijk onafhankelijk van elkaar geregeld. In dit verslag wordt verder alleen naar IU selectie gekeken, voor een RC ontwerp voor een voertuigvering zie [10].

Algemene eisen aan een regelsysteem zijn: het systeem moet goedkoop zijn, het moet "begrijpbaar" en betrouwbaar zijn en het moet de gewenste prestatie leveren [7]. Hoe complexer een systeem is, hoe moeilijker het wordt om aan deze eisen te voldoen. Daar komt nog bij dat hogere prestatie-eisen vaak tot complexere regelstrategieën leiden. Deze hogere prestatie-eisen vragen ook een hogere robuustheid voor modelonzekerheden. Met robuustheid voor modelonzekerheden wordt hier bedoeld dat de stabiliteit en de prestatie van het systeem gegarandeerd is ondanks modelonzekerheden. Een model van een complex systeem heeft echter vaak een grotere modelonzekerheid die de te bereiken robuustheid negatief beïnvloed. *Complexiteit en prestatie* zijn dus belangrijke aspecten bij het regelaarontwerp, resulterend in de volgende doelstelling [7]:

"Minimaliseer de complexiteit van het regelsysteem binnen de eisen die aan de prestatie gesteld zijn in de aanwezigheid van modelfouten"

De complexiteit van een regelsysteem wordt voor een groot deel bepaald door het aantal in- en uitgangen die voor de regeling gebruikt worden (bepaald bij IU selectie) en het

aantal terugkoppelingsverbindingen tussen de in- en uitgangen (bepaald bij RC ontwerp). RSO is dus belangrijk voor het terugdringen van de complexiteit, maar ook voor het behalen van prestatie. Dit laatste omdat een verkeerde keuze van actuatoren en sensoren beperkingen op kan leggen aan de te bereiken prestatie die niet altijd te verhelpen zijn met geavanceerde regeltechniek.

RSO vindt in de praktijk voornamelijk plaats op basis van gevoel en ervaring. Echter hoe groter en complexer een systeem is, hoe groter de kans dat een veelbelovende IU combinatie en RC over het hoofd worden gezien. Vandaar verdient de ontwikkeling van een systematische en kwantitatieve methode voor RSO de aandacht. Systematisch om te voorkomen dat er dingen over het hoofd worden gezien en kwantitatief om een duidelijk onderscheid te kunnen maken tussen goede en slechte kandidaten.

De IU methode uit [7] is indirect. Dat wil zeggen dat alle mogelijke IU combinaties bij IU selectie met elkaar vergeleken moeten worden om tot een "optimale" keuze te komen. Dit in tegenstelling tot een directe methode, waarbij op basis van het model van het systeem en de gestelde prestatie-eisen de optimale IU set wordt bepaald. Omdat het aantal kandidaat IU sets al snel toeneemt met het toenemen van het aantal in- en uitgangen, moet de methode ook efficiënt zijn. (Naast een korte rekentijd moet ook de tijd die nodig is voor analyse beperkt zijn).

Het verslag is als volgt opgebouwd. In Hoofdstuk 2 wordt de theorie voor IU selectie kort besproken. In Hoofdstuk 3 wordt vervolgens kort het model van een trekker-oplegger combinatie behandeld, waarna de theorie op het model wordt toegepast. Er wordt ook naar het geregelde gedrag van het systeem gekeken. Tot slot worden in Hoofdstuk 4 de conclusies en aanbevelingen besproken.

HOOFDSTUK 2

SELECTIE VAN ACTUATOREN EN SENSOREN

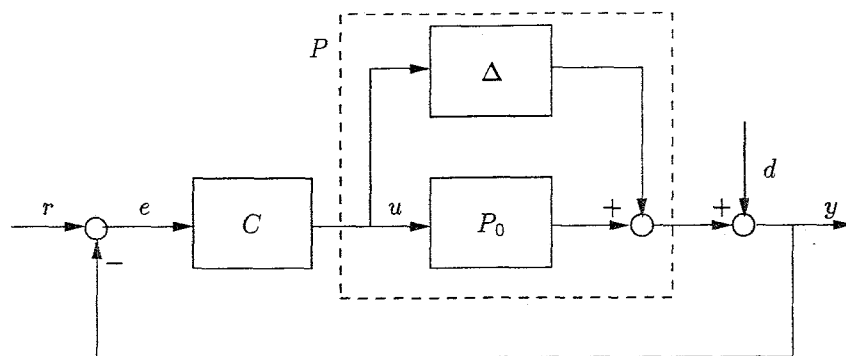
2.1 Achtergrond

Het ideale selectie criterium maakt gebruik van een *noodzakelijke* en *voldoende* voorwaarde voor validatie van een kandidaat IU set [7]. Zo'n criterium is effectief, omdat alleen de gewenste IU sets overblijven. Het valideren van een noodzakelijke en voldoende voorwaarde voor het gestelde doel, houdt echter vaak in dat de regelaar al ontworpen moet zijn. Hierdoor wordt het selectie criterium inefficiënt voor een groot aantal IU sets. Hetzelfde geldt voor een criterium gebaseerd op een voldoende voorwaarde. Een selectie criterium gebaseerd op een noodzakelijke voorwaarde blijft dus over. Aan een noodzakelijke voorwaarde kunnen naast alle gewenste IU sets ook ongewenste IU sets voldoen. Het is dus *niet* gegarandeerd dat voor IU sets die overblijven regelaars te vinden zijn die aan de gestelde eisen voldoen. De uiteindelijke keuze voor de "optimale" IU set gebeurt door het vergelijken van het geregelde gedrag voor een kleine verzameling veelbelovende IU sets.

Het criterium voor IU selectie uit [7] is gebaseerd op het principe van robuuste stabiliteit voor het systeem P_0 bij aanwezigheid van een door de ∞ -norm begrensde additieve modelonzekerheid Δ , zie Figuur 2.1. Een noodzakelijke en voldoende voorwaarde voor robuuste stabiliteit met C een regelaar die P_0 stabiliseert, is dan:

$$\bar{\sigma}(C(I+P_0C)^{-1}) < \frac{1}{\bar{\sigma}(\Delta)} \quad \forall \omega \quad (2.1)$$

Als aan (2.1) is voldaan, is gegarandeerd dat C alle P stabiliseert.



Figuur 2.1: Regelsysteem met additieve verstoring

2.2 HET SELECTIECRITERIUM

Het selectie criterium ontstaat door de noodzakelijke en voldoende voorwaarde voor robuuste stabiliteit (2.1) te verzwakken tot een noodzakelijke voorwaarde voor robuuste stabiliteit (1.) en nominale prestatie (2.). Dit verzwakken is noodzakelijk om te bereiken dat (2.2) onafhankelijk wordt van C en dus voor het regelaarontwerp kan worden toegepast. Het resultaat is hieronder weergegeven als criterium (2.2). Het bewijs is gegeven in [7].

Stel P_0 is een vierkant, Eindig Dimensionaal Linear TijdsInvariant (EDLTI) nominaal systeem. Onder deze aannames bestaat er een EDLTI regelaar C die:

1. alle systemen $P = P_0 + \Delta$ stabiliseert
 - (a) met hetzelfde aantal polen in het rechter halfvlak als P_0
 - (b) waarvoor geldt: $\frac{\bar{\sigma}(\Delta)}{\bar{\sigma}(P_0)} \leq \delta_{ra}$
2. en die er voor zorgt dat: $\bar{\sigma}(S) \leq \sigma_s, \sigma_s < 1 \quad \forall \quad \omega \leq \omega_s$

alleen als

$$\kappa(P_0) < \frac{1}{\delta_{ra}} \left(\frac{1}{1 - \sigma_s} \right) \quad \forall \quad \omega \leq \omega_s \quad . \quad (2.2)$$

Hierin zijn:

- $S = (I + P_0 C)^{-1}$ de nominale uitgangsgevoeligheidsfunctie ("sensitivity") van het gesloten-lus systeem,
- $\kappa = \bar{\sigma}(P_0) / \underline{\sigma}(P_0)$ het Euclidische conditiegetal van het te regelen systeem,
- δ_{ra} de door de ontwerper te specificeren relatief-additieve onnauwkeurigheds-marge,
- σ_s en ω_s de door de ontwerper te specificeren prestatie in termen van S .

Uit (2.2) blijkt dat voor een subsysteem met een "groot" conditiegetal slechts "kleine" modelonzekerheden δ_{ra} toelaatbaar zijn, wil het systeem robuust stabiel zijn en kunnen de prestatie-eisen niet te hoog zijn (σ_s niet te klein). Via het IU selectie criterium (2.2) kunnen nu echter de woorden "groot" en "klein" gekwantificeerd worden.

Het systeem P met de geselecteerde IU set is een vierkant subsysteem (wat inhoudt dat er evenveel in- als uitgangen zijn) van het totale systeem P^* met alle mogelijke in- en uitgangen, dat niet vierkant hoeft te zijn. Het vierkant zijn van de subsystemen is een aanname die tijdens de afleiding van (2.2) wordt gedaan. Deze aanname is nodig omdat bij de afleiding gebruik wordt gemaakt van P^{-1} , die niet bestaat voor niet-vierkante systemen.

De ideale IU selectiemethode zou *gegeven* de regeldoelen z *die* metingen y selecteren waarmee de gewenste prestatie gehaald kan worden. Dit is bij de methode uit [7] niet zonder meer het geval. In [7] wordt aangenomen (al wordt dit niet expliciet vermeld) dat elk regeldoel z vertegenwoordigd is door tenminste één meting y en dat de prestatie-eisen voor z te vertalen zijn naar zinvolle eisen voor y . Op die manier wordt geprobeerd z te regelen door y te regelen. Het selectie criterium van Reeves is gebaseerd op robuuste stabiliteit van het systeem en nominale prestatie voor y . Als het criterium zonder de aanname dat elk regeldoel z vertegenwoordigd is door tenminste één meting y wordt toegepast, kan een geselecteerd subsysteem weliswaar robuust stabiel zijn en aan de nominale prestatie-eisen voor y voldoen, maar niet voldoen aan de gestelde prestatie-eisen voor z . Een criterium dat uitgaat van robuuste prestatie voor z zou daarom beter zijn. Deze aanname zorgt ervoor dat als één regeldoel maar vertegenwoordigd wordt door één meting y , deze in de geselecteerde IU set moet voorkomen. Hieruit volgt dat het criterium vooral geschikt is om een keuze te maken uit een overvloed aan metingen om één regeldoel te bereiken. Het feit dat bepaalde metingen in de geselecteerde IU set *moeten* voorkomen (om aan de gewenste prestatie te voldoen) brengt de systematiek van de methode in gevaar, aangezien het bepalen van deze metingen op inzicht gebeurt in [7].

De prestatie-eisen aan het systeem worden vertaald in eisen aan de gevoeligheidsfunctie S. S is onder meer belangrijk voor het volgedrag van het systeem en de verstoringsonderdrukking [6, Paragraaf 1.4]. Als S klein is dan is het volgedrag goed en worden de verstoringen verzwakt doorgegeven aan y . Maar omdat geldt: $S + T = 1$, met T de complementaire uitgangsgevoeligheidsfunctie (complementary sensitivity) is het niet mogelijk om S voor alle frequenties klein te krijgen. De grootte van T is van invloed op de meetruisonderdrukking: als T klein is wordt de meetruis sterk onderdrukt, dus is het van belang dat T voor hoge frequenties klein is. Van S wordt geëist dat voor frequenties beneden ω_s , S kleiner is dan σ_s . Voor frequenties beneden ω_s is dan het volgedrag acceptabel, en worden de verstoringen onderdrukt. Een hogere ω_s legt dus zwaardere eisen op aan S. Het criterium heeft dus alleen zin als het volgedrag en de verstoringreductie maatgevend zijn voor de prestatie van het systeem. Voor σ_s en ω_s worden voor alle IU sets dezelfde waarden genomen, terwijl de sets uit heel verschillende metingen en ingangen kunnen bestaan, waarvoor de eisen verschillend zijn. Een effectievere aanpak is dus dat voor elke IU set andere waarden voor σ_s en ω_s worden gekozen. Een nadeel hiervan is dat dit erg veel tijd kost en hiernaar zal in dit verslag verder niet worden gekeken.

De relatieve-additieve onnauwkeurigheidsmarge δ_{ra} wordt in [7] vooral gezien als een parameter waarmee het aantal IU sets die na selectie overblijven is te beïnvloeden: als het aantal systemen dat voldoet "te groot" is om voor elk overgebleven subsysteem een regelaar te ontwerpen dan wordt δ_{ra} verhoogd. Als er geen of maar enkele subsystemen overblijven wordt δ_{ra} verlaagd. In [7] wordt de IU selectie toegepast voor één δ_{ra} en één frequentie die voor alle IU sets hetzelfde zijn. Het lijkt beter een frequentie-afhankelijke $\delta_{ra}(j\omega)$ te gebruiken waarbij alle kennis over de verwachte onzekerheid gebruikt wordt. Wanneer een constante waarde voor δ_{ra} wordt gebruikt, wordt genegeerd dat voor lage frequenties de modelfouten veelal kleiner zijn dan voor hogere frequentie. Omdat de relatie $\bar{\sigma}(\Delta)/\bar{\sigma}(P_0) \leq \bar{\sigma}(\Delta^*)/\bar{\sigma}(P_0^*)$ niet geldt, is er niet direct een onzekerheidsgrens af te leiden die voldoet voor alle subsystemen. Dus moet δ_{ra} voor elk subsysteem afzonderlijk uitgerekend worden, wat problemen kan opleveren als het aantal subsystemen te groot wordt. Ondanks de beperking van de beschikbare rekentijd is een δ_{ra} voor elk individueel subsysteem effectiever dan één bovengrens voor alle subsystemen die groter moet zijn dan alle δ_{ra} 's van de subsystemen. Een subsysteem met een conditiegetal dat voor een frequentie (kleiner dan ω_s) groter is dan het rechterlid van (2.2) met voor δ_{ra} de algemene bovengrens, zal bij IU selectie niet voldoen, terwijl de kans bestaat dat als de bij het subsysteem behorende δ_{ra} was gebruikt het subsysteem wél zou voldoen, omdat de δ_{ra} voor het betreffende frequentiegebied juist kleiner is dan het conditiegetal van het subsysteem. De vaste δ_{ra} in (2.2) wordt dus vervangen door een δ_{ra} die voor elk subsysteem volgens $\bar{\sigma}(\Delta)/\bar{\sigma}(P_0)$ uitgerekend moet worden.

Aangezien niet alleen het conditiegetal κ maar ook δ_{ra} schalingsafhankelijk is (toelichting in Bijlage 2) is van (2.2) in principe het linker- en het rechterlid schalingsafhankelijk. Daarnaast is ook $\bar{\sigma}(S)$ schalingsafhankelijk (toelichting in Bijlage 2), maar om het criterium voor het regelaarontwerp toe te kunnen passen wordt $\bar{\sigma}(S)$ door specificaties hiervoor (σ_s en ω_s) vervangen. Deze specificaties worden onafhankelijk van schaling gedaan, omdat de prestatie-eisen voor een geschaald systeem hetzelfde zijn als voor een ongeschaald systeem. Omdat in [7] δ_{ra} óók wordt gespecificeerd, wordt het rechterlid van (2.2) schalingsonafhankelijk. Het specificeren in [7] van σ_s en δ_{ra} gebeurt voor alle IU sets hetzelfde, wat een nadeel is van de methode. Wanneer elke P_0 heel slecht wordt geschaald kan $\kappa(P_0) \Rightarrow \infty$, waardoor geen enkele IO set door het selectie criterium komt. Dit is de reden voor Reeves om te zeggen dat "specificatie van σ_s en δ_{ra} gebaseerd is op de aanname dat het systeem (P_0) goed geschaald is". Zoals het criterium wordt toegepast door Reeves heeft het zin om naar schaling te kijken, omdat door goede schaling van P_0 het conditiegetal van P_0 kleiner wordt terwijl het rechterlid gelijk blijft en er dus meer IU sets overblijven. Aangezien er in dit verslag voor gekozen is om de beschikbare kennis voor de modelonzekerheid mee te nemen in δ_{ra} , is δ_{ra} schalingsafhankelijk (zie Bijlage 2). Hierdoor is het rechterlid van (2.2) schalingsafhankelijk. Maar of er naar schaling gekeken moet worden als het criterium zo wordt toegepast is twijfelachtig. P_0 kan nu goed geschaald worden (wat dezelfde schaling voor Δ inhoudt), waardoor het conditiegetal kleiner wordt. Het is echter niet duidelijk wat voor een gevolg dit heeft voor $\bar{\sigma}(\Delta)/\bar{\sigma}(P_0)$. Het staat dus niet vast of er meer of minder IU sets overblijven.

Omdat op de manier zoals Reeves het criterium toepast het rechterlid van (2.2) schalingsonafhankelijk is, vervangt ze het conditiegetal door een schalingsonafhankelijke grootte, waarin de Relative Gain Array (RGA) $\Lambda = P_0 * (P_0^{-1})^T$ (met * elementsgewijze vermenigvuldiging) een rol speelt. Criterium (2.2) verandert nu in het schalingsonafhankelijke criterium (2.3):

$$2 \max\{\|\Lambda(P_0)\|_1, \|\Lambda(P_0)\|_\infty\} - 1 < \frac{1}{\delta_{ra}} \left(\frac{1}{1-\sigma_s} \right) \quad \forall \quad \omega \leq \omega_s \quad (2.3)$$

Aangezien $2 \max\{\|\Lambda(P_0)\|_1, \|\Lambda(P_0)\|_\infty\} - 1 \leq \kappa(P_0)$ is dit criterium dus 'zwakker' (meer subsystemen voldoen) dan het schalingsonafhankelijke criterium (2.2) en is dus een *noodzakelijke* voorwaarde, evenals (2.2). Reeves past nu het schalingsonafhankelijke criterium toe om een groot aantal IU sets te elimineren om vervolgens de overgebleven subsystemen te schalen en daar het schalingsonafhankelijke criterium op toe te passen. Dit is volgens Reeves efficiënter, omdat nu niet meer alle IU sets afzonderlijk geschaald hoeven te worden. Als het mogelijk is om het systeem P^* met alle mogelijke in- en uitgangen goed te schalen zijn automatisch de subsystemen goed geschaald. Omdat de subsystemen dan niet meer afzonderlijk geschaald hoeven te worden vervalt het efficiëntie-voordeel van (2.3) grotendeels. Wat rest is P^* goed te schalen.

Bij de discussie over de schalingsonafhankelijkheid van (2.2) is opgemerkt dat door de hier gebruikte keuze voor δ_{ra} het rechterlid van (2.2) niet schalingsonafhankelijk wordt (wat wel gebeurt als δ_{ra} wordt gespecificeerd zoals Reeves dat doet). Hierdoor vervalt het nut om naar schaling te kijken en vervalt dus het voordeel dat Reeves voor het schalingsonafhankelijke criterium (2.3) geeft, aangezien de subsystemen nu niet meer afzonderlijk geschaald hoeven te worden. In het verslag wordt dus verder met criterium (2.2) gewerkt.

HOOFDSTUK 3

DE TOEPASSING

3.1 DE TREKKER-OPLEGGER COMBINATIE

Het systeem waar de IU selectie op toegepast wordt is een model van een trekker-oplegger combinatie, dat is afgebeeld in Bijlage 1, Figuur b.1. De prestatie van een veersysteem voor vrachtwagens wordt vooral bepaald door [3, Paragraaf 2.1.1.]: het comfort van de bestuurder, de krachten op de lading, de benodigde veerweg, de wegligging en de dynamische wiellast. De veerweg is van belang in verband met de beperkte inbouwruimte: hoe kleiner de veerweg hoe meer ruimte er overblijft voor de lading, aangezien de maximum hoogte van een vrachtwagen beperkt is. De dynamische wiellast moet klein blijven om de beschadigingen aan het wegdek te beperken. Het comfort en de krachten op de lading worden onder andere bepaald door de verticale versnellingen en hoekversnellingen, die dus laag moeten blijven. Een actief veersysteem zal waarschijnlijk betere prestaties leveren dan een passief veersysteem voor een bepaald wegdek. Bovendien kan het dynamisch-gedrag bij een actief veersysteem aangepast worden aan de rij-omstandigheden. Zo kan het actieve veersysteem voor een snelweg anders afgesteld worden dan voor een klinkerweg.

Het probleem is nu waar de fysische uitvoering van het actieve veersysteem (de actuator(en)) moet komen en welke grootheden gemeten moeten worden. Naast de mogelijkheid voor het plaatsen van actuatoren tussen de wielen en het chassis wordt hier ook gekeken naar de mogelijkheid van een actuator onder de cabine en onder de motor. In [3] wordt de actieve veerophanging bij de achterwielen van de trekker geplaatst (u), omdat excitatie van de achterwielen van de trekker de grootste oorzaak is van de verticale verplaatsing en rotaties van de cabine en van de krachten op de chassiscomponenten en op de lading. De IU selectiemethode zou deze keuze moeten rechtvaardigen.

Er wordt een 2-dimensionaal model met 10 graden van vrijheid beschouwd. De zwaartekracht is verdisconteerd door de relatieve veerindrukking op nul te stellen in de evenwichtstoestand. Bij aanname dat de hoeken φ_{ch} , φ_{tr} , φ_{cb} en φ_m (Bijlage 1 Figuur b.2.) klein zijn, kan het lineaire model door de volgende toestandsbeschrijving weergegeven worden:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B_u u(t) + B_w w(t) \\ y(t) &= Cx(t) + D_u u(t) + D_w w(t) \\ z(t) &= Ex(t) + F_u u(t) + F_w w(t) \end{aligned} \quad (3.1)$$

met:

toestandsvariabele	$x^T = [$	q_{af}	q_{ar}	q_{at}	q_{ch}	φ_{ch}	φ_t	q_{cb}	φ_{cb}	q_m	φ_m	$]$
		\dot{q}_{af}	\dot{q}_{ar}	\dot{q}_{at}	\dot{q}_{ch}	$\dot{\varphi}_{ch}$	$\dot{\varphi}_t$	\dot{q}_{cb}	$\dot{\varphi}_{cb}$	\dot{q}_m	$\dot{\varphi}_m$	$]$

kandidaat ingangen $u^T = [u_f \quad u_r \quad u_t \quad u_{cb} \quad u_m]$

excitatie door de weg $w^T = [q_{rf} \quad q_{rr} \quad q_{rt}]$

te regelen grootheden $z^T = [\begin{array}{cccc} q_{af} - q_{rf} & q_{ar} - q_{rr} & q_{at} - q_{rt} & \\ q_{cf} - q_{af} & q_{cr} - q_{ar} & q_{ct} - q_{at} & \\ q_{cbf} - q_{ccbf} & q_{cbr} - q_{ccbr} & q_{cmf} - q_{cmr} & q_{mr} - q_{cmr} \\ \ddot{\psi}_t & \ddot{q}_{cb} & \ddot{\psi}_{cb} &] \end{array}$

kandidaat metingen $y^T = [\begin{array}{ccccc} q_{cf} - q_{af} & q_{cr} - q_{ar} & q_{ct} - q_{at} & & \\ q_{cbr} - q_{ccbr} & q_{mr} - q_{cmr} & & & \\ \ddot{q}_{af} & \ddot{q}_{ar} & \ddot{q}_{at} & & \\ \ddot{q}_{cf} & \ddot{q}_{cr} & \ddot{q}_{ct} & \ddot{q}_{cbr} & \ddot{q}_{mr} \end{array}$

De verschillende matrices die verder nog een rol in de Vergelijkingen (3.1) spelen staan in Bijlage 1. De IU selectietheorie uit [7] gaat uit van het regelschema dat is afgebeeld in Figuur 2.1. Het toestandsmodel (3.1) wordt dus omgeschreven naar:

$$y(s) = P(s) u(s) + d(s) \tag{3.2}$$

met : $P(s) = C(sI - A)^{-1} B_u + D_u$
 $d(s) = (C(sI - A)^{-1} B_w + D_w) w(s)$

Via de verstoring d wordt de wegexcitatie weergegeven in de metingen y .

In de IU selectie zijn er 13 kandidaat metingen en 5 kandidaat ingangen. Omdat de Matlab toolbox alleen met vierkante systemen werkt is voor het betreffende systeem de maximale dimensie voor een subsysteem 5.

Eén van de voorwaarden voor de IU selectie is dat er een verband bestaat tussen de metingen y en te regelen grootheden z . Dat is hier niet het geval voor de bandindrukking (dynamische wiellast) die in z ($q_{af}-q_{rf}$, $q_{ar}-q_{rr}$, $q_{at}-q_{rt}$) voorkomt omdat de wegexcitatie w (q_{rf} , q_{rr} , q_{rt}) niet gemeten wordt. De prestatie-eisen aan de bandindrukking kunnen dus niet naar metingen vertaald worden.

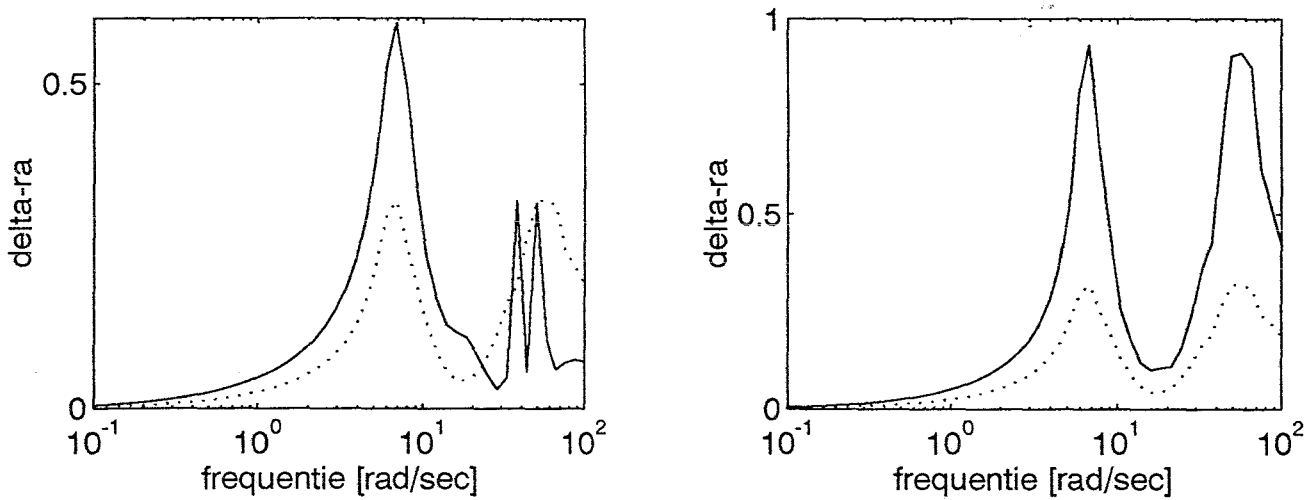
Een voorwaarde voor het ontwerp van een stabiliserende regelaar is dat het systeem detecteerbaar en stabiliseerbaar is. Detecteerbaarheid wil zeggen dat de instabiele modes observeerbaar moeten zijn. Het systeem (het model van trekker-oplegger) is aan de hand van elke willekeurige meting uit y observeerbaar. Hieruit volgt dat elk mogelijk subsysteem met bijbehorende metingen observeerbaar is, wat automatisch inhoudt dat

het ook detecteerbaar is. Voor de geselecteerde ingangen geldt dat het systeem aan de hand van deze ingangen stabiliseerbaar moet zijn: de instabiele modes moeten regelbaar zijn. Hier geldt dat het systeem regelbaar is voor elke willekeurige ingang uit u . Dus elk subsysteem met bijbehorende ingangen is regelbaar en dus stabiliseerbaar.

3.2 DE SPECIFICATIES VOOR IU SELECTIE

Om het criterium uit Paragraaf 2.1 toe te kunnen passen voor IU selectie moeten eerst de onzekerheid δ_{ra} en de eisen voor $\bar{\sigma}(S)$ bepaald worden. Van de grootte $\bar{\sigma}(S)$ wordt geëist dat deze voor frequenties beneden ω_s lager dan σ_s ligt. Uit Paragraaf 2.2 volgt dat elk regeldoel door minimaal 1 meting vertegenwoordigd moet worden wil de prestatie gegarandeerd zijn. Aangezien het aantal in- en uitgangen maximaal 5 is, is dit ook het maximaal aantal regeldoelen (wat minder is dan het aantal in z) waar de selectie op kan plaatsvinden. De prestatie-eisen worden in (2.2) echter vertegenwoordigd door een scalaire maat σ_s en die kan dus slechts één regeldoel vertegenwoordigen. Hier wordt als regeldoel voor de selectie het comfort van de chauffeur gekozen, dat vooral bepaald wordt door horizontale versnellingen in het frequentiegebied van 1 tot 2 [Hz] en verticale versnellingen in het frequentiegebied van 4 tot 8 [Hz] [3, Paragraaf 3.1]. Om nu de overdracht van ongewenste frequenties in d naar y te beperken wordt in het vervolg voor S de bandbreedte ω_s bepaald op $2\pi \cdot 8 \approx 50$ [rad/s]. Voor σ_s wordt de definitie van bandbreedte, $\frac{1}{2}\sqrt{2}$, genomen (zoals in [7]), en deze specificatie zijn hetzelfde voor alle IU sets.

δ_{ra} wordt voor *elke* kandidaat IU set en *elke* frequentie opnieuw uitgerekend. Om dit te kunnen doen moet eerst Δ bepaald worden, die onder andere veroorzaakt kan worden door een andere massa van de lading, niet-lineaire veer- en demperkarakteristieken en foute traagheidsparameters. In [3, Paragraaf 6.2] wordt vermeld dat vooral de dempingscoëfficiënten onnauwkeurig zijn. Hierom en omdat niet alle onzekerheden meegenomen kunnen worden, valt de keuze op de mogelijkheid van een simultane onzekerheid voor de vijf dempingscoëfficiënten. Voor deze onzekerheid wordt in eerste instantie -25% genomen, omdat de δ_{ra} die zo ontstaat groter is dan de δ_{ra} bij +25% (voor frequenties kleiner dan ω_s). Dit heeft als voordeel dat een IU set die aan (2.2) voldoet bij een δ_{ra} behorend bij een onzekerheid van -25% ook zal voldoen bij een δ_{ra} behorend bij een onzekerheid van +25%. Als het aantal systemen dat overblijft nu te groot of te klein is kan dit percentage aangepast worden om zo δ_{ra} te veranderen waardoor het Criterium (2.2) meer of minder streng wordt. Het voordeel om δ_{ra} op deze manier aan te passen in plaats van δ_{ra} met een constante factor vermenigvuldigen is dat het een betere fysische interpretatie dient: een verhogen van het onzekerheidspercentage met een factor twee bijvoorbeeld, heeft niet een δ_{ra} tot gevolg die ook twee maal zo groot is (zie Figuur 3.2). Een nadeel kan zijn dat het meer werk is. Voor een idee van de grootte van δ_{ra} en de invloed van een ander foutpercentage zie Figuur 3.2.



Figuur 3.2: Links: de grootte van δ_{ra} voor twee verschillende subsystemen: $y_6 y_7 / u_1 u_2$ (\cdots), $y_1 y_9 / u_2 u_5$ ($-$).
 Rechts: de grootte van δ_{ra} voor één subsysteem ($y_6 y_7 / u_1 u_2$) met een verschillend percentage voor de demperfout: -25% (\cdots), -50% ($-$).

3.3 DE RESULTATEN VAN IU SELECTIE

De IU selectiemethode wordt nu toegepast op het model van de trekker-oplegger combinatie uit Paragraaf 3.1. In Tabel 3.1 is het aantal mogelijke subsystemen voor een systeem met 13 mogelijke metingen en 5 mogelijke ingangen weergegeven.

dimensie subsysteem	aantal subsystemen
1	65
2	780
3	2860
4	3575
5	1287
n	$\sum_{i=1}^n \left(\frac{n!}{i(n-i)!} \right)^2$

Tabel 3.1: Het aantal subsystemen per dimensie

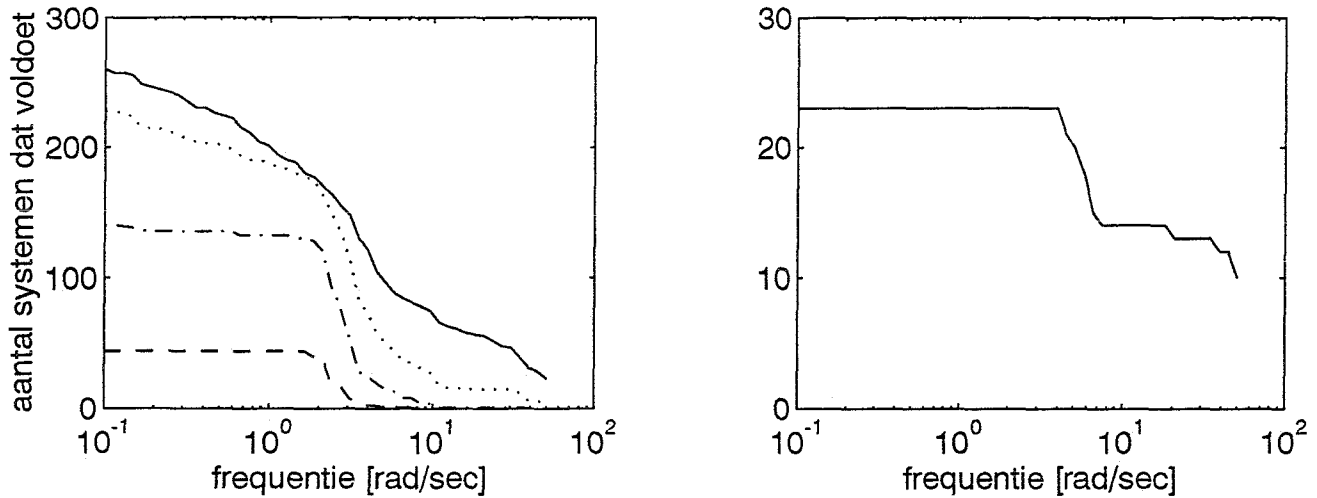
Een IU set voldoet pas als het conditiegetal voor alle frequenties beneden ω_s kleiner is dan het rechterlid van (2.2). Voor frequentie 0.1 [Hz] worden alle mogelijke IU sets aan het criterium aangeboden. Slechts een gedeelte voldoet en wordt in een subset gestopt. Op de volgende discrete frequentie wordt nu die kleinere subset voor het criterium geëvalueerd. Het aantal discrete punten tussen 0.1 en 50 [rad/s] is afhankelijk van de beschikbare rekentijd. In eerste instantie wordt het frequentiegebied logaritmisch in 50 verdeelde punten opgedeeld.

Voor de 1×1 systemen geldt dat het conditiegetal altijd 1 is. Dus alle mogelijke 1×1 IU sets voldoen als het rechterlid groter is dus één en alle mogelijke 1×1 IU sets voldoen niet als het rechterlid kleiner is dan 1. De 1-dimensionale subsystemen voldoen niet als δ_{ra} groter dan 3.4 is (bij $\sigma_s = \frac{1}{2}\sqrt{2}$), wat overeenkomt met een modelonzekerheid van 340%. De δ_{ra} van de mogelijke 1×1 IU sets zijn voor $\omega \leq \omega_s$ kleiner dan 3.4 en voldoen al deze 65 subsystemen. De 1-dimensionale subsystemen worden daarom verder buiten beschouwing gelaten.

De boven beschreven werkwijze wordt eerst op het model van de trekker-oplegger combinatie toegepast met een simultane onzekerheid van de dempingscoëfficiënten van -25 %. In Figuur 3.4 is het aantal overgebleven IU sets te vinden. Het aantal IU sets dat voor het hele frequentiegebied voldoet staat in Tabel 3.2. Wat opvalt is dat hoe hoger de dimensie van het subsysteem is hoe sneller het aantal IU sets dat voldoet afneemt, terwijl δ_{ra} voor hoge dimensies kleiner wordt. Een verklaring hiervoor ontbreekt nog. Voor de 2-dimensionale subsystemen is het aantal dat voldoet "te groot" om het geregelde gedrag met elkaar te vergelijken. Om dit aantal te verminderen wordt de fout in de dempingscoëfficiënten verhoogd naar -50% en wordt (2.2) met deze fout toegepast op de IU sets (23) die bij -25% voldoen. Het aantal subsystemen dat dan overblijft staat eveneens in Tabel 3.2. Voor de 4- en 5-dimensionale systemen, waarvan er bij -25% geen voldoen, zou dit percentage verlaagd kunnen worden. Dit wordt niet gedaan, omdat de enige modelonzekerheid die meegenomen is de fout in de dempingscoëfficiënten is, terwijl er in werkelijkheid ook andere modelonzekerheden zijn. Dus met het oog op de werkelijke modelonzekerheid heeft het geen zin dit percentage te verlagen.

dimensie subsysteem	aantal subsystemen bij -25 %	aantal subsystemen bij -50%
2	23	10
3	4	-
4	0	-
5	0	-

Tabel 3.2: Het aantal subsystemen dat per dimensie aan (2.2) voldoet



Figuur 3.4: *Links*: het aantal systemen dat per dimensie voldoet bij -25 % uitgezet tegen de frequentie. 2×2 (-), 3×3 (··), 4×4 (-·), 5×5 (--).
Rechts: het aantal 2- dimensionale systemen dat voldoet bij -50% uitgezet tegen de frequentie (er wordt begonnen met de IU sets die bij -25% voldoen).

De 10 2-dimensionale systemen (met -50% fout in de dempingscoëfficiënten) en de 4 3-dimensionale systemen (met -25% fout in de dempingscoëfficiënten) uit Tabel 3.2 komen voor verdere evaluatie in aanmerking. Voor deze systemen wordt het conditiegetal $\kappa(P)$ en de bovengrens $1/\delta_{ra} \times 1/(1-\sigma_s)$ van ongelijkheid (2.2) uitgezet in Bijlage 3. Dit gebeurt voor 200 i.p.v. 50 logaritmisches verdeelde punten in het frequentiegebied van 1 tot 50 [rad/s], aangezien voor frequenties kleiner dan 1 voor de overgebleven IU sets het conditiegetal veel kleiner is dan het rechterlid van (2.2). Nu wordt bekeken of de subsystemen nog steeds voldoen (of het conditiegetal kleiner is dan de grens) ondanks het verhogen van het aantal punten. Of het subsysteem nog voldoet staat eveneens in Tabel 3.3.

Bij de evaluatie van de IU sets uit Tabel 3.3 moet er rekening mee worden gehouden dat er alleen uitgegaan is van een fout in de dempingsconstante en er geen rekening gehouden is met andere modelonzekerheden. Een systeem dat maar net voldoet zal in werkelijkheid door aanwezigheid van andere modelfouten niet robuust stabiel zijn en niet aan de nominale prestatie voldoen voor de aanwezige modelfouten. Bij subsystemen die als veelbelovend aangemerkt kunnen worden moet het conditiegetal dus een "stuk" lager (kwalitatief) liggen dan de grens die afhankelijk is van δ_{ra} . Op basis hiervan worden de meest belovende IU sets bepaald.

3.3. De resultaten van IU selectie

nummer subsysteem	2 × 2 IU-subsysteem	voldoet
1	$y_1 y_2 / u_1 u_2$	+
2	$y_2 y_3 / u_2 u_3$	-
3	$y_6 y_7 / u_1 u_2$	+
4	$y_6 y_7 / u_2 u_4$	+
5	$y_6 y_8 / u_1 u_3$	+
6	$y_6 y_8 / u_2 u_3$	-
7	$y_6 y_8 / u_3 u_4$	+
8	$y_7 y_8 / u_2 u_3$	+
9	$y_{10} y_{11} / u_2 u_3$	+
10	$y_{11} y_{12} / u_2 u_3$	+
	3 × 3 IU-subsysteem	
11	$y_1 y_2 y_3 / u_1 u_2 u_3$	-
12	$y_1 y_2 y_3 / u_1 u_2 u_5$	+
13	$y_6 y_7 y_8 / u_1 u_2 u_3$	+
14	$y_6 y_7 y_8 / u_2 u_3 u_4$	+

Tabel 3.3: De IU sets die aan (2.2) voldoen

Bij het bekijken van subsystemen uit Tabel 3.3 die voldoen valt op dat er geen combinaties voorkomen van verplaatsingen (y_1 t/m y_5) en versnellingsmetingen (y_6 t/m y_{13}). Ook is er tussen de versnellingsmetingen een onderscheid te maken tussen metingen aan de assen (y_6, y_7, y_8) en de andere versnellingsmetingen (y_9 t/m y_{13}). Vooral combinatie van de versnellingsmetingen aan de assen zien er veelbelovend uit. Met name de subsystemen 3, 7, 8, 13 en 14).

In Paragraaf 3.1 wordt u_2 als een goede actuator genoemd. Dit lijkt min of meer ook uit de IU selectie te komen aangezien u_2 in bijna alle geselecteerde IU sets voorkomt (niet in sets 5 en 7), ondanks dat de achtergronden van de oorspronkelijke keuze waarschijnlijk 3.1 geen robuuste stabiliteit en prestatie-eisen aan de gevoeligheidsfunctie zijn. Actuator u_5 van de motor daarentegen komt alleen bij subsysteem 12 voor. Het lijkt dus geen zin te hebben om onder de motor een actuator te plaatsen aangezien de systemen die hier een actieve vering zouden hebben geen grote mate van robuuste stabiliteit en nominale prestatie zouden hebben.

3.4 HET GEREGELDE GEDRAG

De uiteindelijke keus van de IU sets vindt plaats op basis van het vergelijken van het geregelde gedrag voor de overgebleven meest belovende IU sets. Hier wordt het geregelde gedrag van de meest belovende IU sets ook vergeleken met dat van IU sets die niet aan het selectie criterium voldoen (als er een stabiliserende regelaar voor te ontwerpen is) om zo te bekijken of de uitkomsten van de IU selectie ondersteunend kunnen worden met simulaties van het geregelde gedrag.

De eerste stap in het ontwerp van een regelsysteem is het bepalen van de te regelen grootheden z (Paragraaf 3.1), en de specificaties daarvoor. Voor de banden geldt dat de dynamische wiellast niet groter mag worden dan de statische wiellast, omdat anders de banden het contact met de weg verliezen. Met behulp van de bandstijfheid is dit om te rekenen naar een maximale banduittrekking. Verder is de maximale bandindrukking begrensd door fysische beperkingen. De waarden hiervoor staan in [4] en in Tabel 3.4. De veerwegen zijn begrensd vanwege de beperkte inbouwruimte. Ook deze waarden staan in [4] en in Tabel 3.4. De versnellingen, waarop de IU selectie gebaseerd is, moeten zo klein mogelijk blijven en het liefst kleiner zijn dan in het ongeregelde systeem. Naast eisen aan de te regelen grootheden zijn er ook beperkingen ten aanzien van de actuatorkrachten, die kleiner dan 10^5 [N] [3, Paragraaf 4.1] moeten blijven.

z	uittrekking [m]	indrukking [m]
z_1	0.034	-0.069
z_2	0.024	-0.079
z_3	0.020	-0.083
z_4	0.14	-0.09
z_5	0.14	-0.09
z_6	0.14	-0.09
z_7	0.05	-0.05
z_8	0.05	-0.05
z_9	0.05	-0.05
z_{10}	0.05	-0.05

Tabel 3.4: de uiterste waarden van de te regelen grootheden

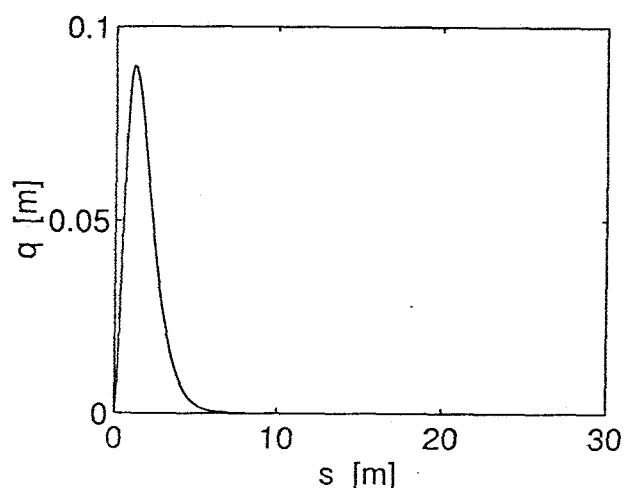
Als regelaar wordt een lineaire terugkoppeling van de geschatte toestand gebruikt: $\mathbf{u} = -\mathbf{L}\hat{\mathbf{x}}$. De bepaling van de terugkoppelingsmatrix \mathbf{L} vindt plaats op basis van weging van \mathbf{z} , zodat de kostenfunctie $\int \mathbf{z}^T \mathbf{Q} \mathbf{z} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}$ geminimaliseerd wordt. Hierin zijn \mathbf{Q} en \mathbf{R} weegmatrices. \mathbf{Q} wordt opgedeeld in $\mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_2$. \mathbf{Q}_1 zorgt voor normering van de weegfactoren en is een matrix met op de diagonalen één gedeeld door de orde grootte van de betreffende te regelen grootheid in het kwadraat. \mathbf{Q}_2 is de door de ontwerper in te stellen weegmatrix om het relatieve belang van de te regelen grootheden uit te drukken.

De te regelen grootheden zijn voor alle IU sets hetzelfde en dus is ook Q (Bijlage 4) voor alle IU sets gelijk. Voor R wordt een eenheidsmatrix gekozen zodat alle ingangen even zwaar worden gewogen. Merk op dat er steeds andere ingangen in de subsystemen naar voren komen. Door de aanwezigheid van de wegexcitatie in model (3.1) is het met de beschikbare Matlab functies niet mogelijk om een optimale regel matrix te bepalen. Om toch met Matlab een optimale regelmatrix te kunnen bepalen wordt aangenomen dat de wegexcitatie klein en daarom te verwaarlozen is. In de kostenfunctie wordt dus niet de bandindrukking gewogen maar de asverplaatsingen q_{af} . Dit blijkt toch betere resultaten voor de bandindrukking op te leveren dan als de bandindrukking niet meegenomen wordt.

Met een Kalmanfilter wordt op basis van het model van het systeem (3.1) uit de gemeten grootheden de toestand gereconstrueerd, om de terugkoppeling $u = -L\hat{x}$ mogelijk te maken. Bij bepaling van de Kalmanversterking K moeten ook twee weegmatrices ingesteld worden. Theoretisch zijn dit de covarianties van de systeemruis en de meetruis. Hier worden deze matrices echter als twee ontwerpparameters gezien om het Kalmanfilter in te stellen. Bij de weegmatrix voor de meetruis wordt echter wel rekening gehouden met het verschil in ordegraad tussen de metingen van de verplaatsingen en de versnellingen, door er van uit te gaan dat de meetfouten van de verplaatsingen 100 maal kleiner is dan die van de versnellingen. Deze weegmatrices zijn vermeld in Bijlage 4.

Het doel van het regelaarontwerp is hier echter niet om het geregeld gedrag voor de verschillende subsystemen te optimaliseren, maar om dit gedrag onderling en met het passieve systeem te vergelijken. Hiervoor worden de matrices L en K bepaald aan de hand van het model van de trekker-oplegger combinatie (3.1) en daarna toegepast op een systeem met dezelfde fout (een simultane onzekerheid van de dempingscoëfficiënten van -50 % voor de 2-dimensionale systemen en -25% voor de 3 dimensionale systemen) als gebruikt is bij de IU selectie. Het referentiesignaal is hierbij nul en als wegverstoring wordt een afgeronde puls (zie figuur 3.5.) gebruikt, zoals ook in [3]. Voor de afgeronde puls geldt:

$$q(s) = q_{\max} \frac{e^2}{4} \left(2\pi \frac{s}{l_d}\right)^2 e^{\left(-2\pi \frac{s}{l_d}\right)}$$



Figuur 3.5: Een afgeronde puls

met s de positie $v \times t$ (v is de snelheid van de trekker-oplegger combinatie), q_{\max} de maximale pulshoogte en l_d de pulslengte. Uit [3, Paragraaf 4.1] worden hiervoor de volgende waarden overgenomen $l_d/v = 0.26$ [s] en $q_{\max} = 0.934$ [m] als kritieke waarden voor een puls. Dit wil zeggen dat de puls ervoor zorgt dat het passieve systeem óf het wegcontact verliest óf dat één van de veren tussen assen en chassis maximaal is uitgerekt (zie z_5 van het passieve systeem in Tabel 3.5). Als snelheid v voor de trekker-oplegger wordt 50 [m/s] genomen. De wegverstoring w bestaat dus uit drie van deze pulsen die in de tijd verschoven zijn. De uiteindelijke beoordeling van de verschillende IU sets gebeurt (evenals in 3) op basis van de maximale en minimale waarden van de te regelen grootheden en het verloop van de deze grootheden.

Uit de geselecteerde IU sets worden de subsysteem 1, 3, 4 en 13 gekozen om een regelaar voor te ontwerpen. Dit gebeurt voor Substelsysteem 3 ($y_6 y_7/u_1 u_2$) omdat in Paragraaf 3.3 dit als een veelbelovend IU set wordt beschouwd. Daarnaast wordt voor subsysteem 1 ($y_1 y_2/u_1 u_2$) gekozen omdat deze in deze IU set verplaatsingen worden gemeten om zo een vergelijking met subsysteem 3 (versnellingsmetingen) te kunnen maken. De keuze valt op Substelsysteem 4 ($y_6 y_7/u_2 u_4$) omdat de metingen gelijk zijn aan subsysteem 3, maar er een andere ingang is. IU set 13 ($y_6 y_7 y_8/u_1 u_2 u_3$) wordt gekozen omdat het het meest belovende 3-dimensionale subsysteem is. Er wordt ook geprobeerd een stabiele regeling voor niet-geselecteerde systemen te ontwerpen. Dit gebeurt voor $y_1 y_7/u_1 u_2$, $y_8 y_{13}/u_1 u_2$ en $y_1 y_8 y_{13}/u_1 u_3 u_4$. IU set $y_1 y_7/u_1 u_2$ wordt gekozen omdat bij IU selectie er geen IU sets met combinaties tussen verplaatsings- en versnellingsmetingen voorkomt. Er kan nu gekeken worden of simulaties dit bevestigen. De IU sets $y_8 y_{13}/u_1 u_2$ en $y_1 y_8 y_{13}/u_1 u_3 u_4$ zijn willekeurig gekozen. Het blijkt ook voor deze drie subsystemen mogelijk om een stabiele regeling te ontwerpen. Deze subsystemen voldoen bij de IU selectie niet, omdat daar uitgegaan wordt van *alle* mogelijke modelfouten met de grootte van δ_{ra} . Voor een andere type modelfout met dezelfde δ_{ra} is het dan ook niet gegarandeerd dat er een stabiliserende regeling ontworpen kan worden. De maximale en minimale waarden van de te regelen grootheden staan voor de verschillende IU sets in Tabel 3.5 voor de 2-dimensionale systemen en in Tabel 3.6 voor de 3-dimensionale systemen. In deze twee tabellen zijn de waarden die de uiterste grenzen (Tabel 3.4) overschrijden vet weergegeven. In Bijlage 4 zijn de geregelde grootheden tegen de tijd uitgezet.

Bij het vergelijken van het geregelde gedrag van de 2-dimensionale systemen valt op dat er tussen $y_1 y_2/u_1 u_2$, $y_1 y_7/u_1 u_2$ en $y_6 y_7/u_1 u_2$ geen grote verschillen zijn, terwijl $y_6 y_7/u_2 u_4$ en $y_8 y_{13}/u_1 u_2$ slechter zijn. Met name IU set $y_6 y_7/u_2 u_4$ overschrijdt veel uiterste waarden voor z terwijl hij wel bij IU selectie voldoet. Wat hierbij opvalt is dat u_4 (zie Bijlage 4) nauwelijks aangestuurd wordt. Substelsysteem $y_1 y_7/u_1 u_2$ daarentegen voldoet bij IU selectie niet en heeft wel goede resultaten. Als het geregelde gedrag vergeleken wordt met het ongeregelde gedrag dan valt op dat de bandindrukkingen (krachten) iets groter worden door de actieve vering. Ook zijn de veerwegen tussen as en chassis iets groter. Opvallend is de vermindering aan de veerindrukking onder de

3.4. Het geregelde gedrag

cabine, behalve bij $y_6 y_7/u_2 u_4$. De versnellingen zijn voor de geregelde systemen voor een groot deel lager dan bij het passieve systeem. Alleen de maximale waarde van de hoekversnelling van de cabine (z_{13}) is groter. Alleen bij subset $y_6 y_7/u_2 u_4$ zijn de uiterste waarden van de versnelling groter dan bij het passieve systeem.

Voor de 3-dimensionale systemen geldt hetzelfde voor de bandindrukkingen en de veerwegen als bij de 2-dimensionale systemen. De versnellingen zijn wel lager als bij het passieve systeem, maar de verlaging is niet zo sterk als bij de 2-dimensionale systemen. Daarbij is het geselecteerde subsysteem, $y_6 y_7 y_8/u_1 u_2 u_3$ beter (de vermindering van de versnelling is groter) dan het niet-geselecteerde subsysteem $y_1 y_8 y_{13}/u_1 u_3 u_4$. Bij deze laatste IU set valt op dat de verticale versnelling van de cabine erg groot is en dat hier u_2 niet in de IU set voor komt.

	ongeregeld		$y_1 y_2/u_1 u_2$		$y_6 y_7/u_1 u_2$		$y_6 y_7/u_2 u_4$		$y_1 y_7/u_1 u_2$		$y_8 y_{13}/u_1 u_2$	
	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min
z_1	0.019	-0.038	0.041	-0.037	0.037	-0.038	0.018	-0.038	0.040	-0.038	0.035	-0.038
z_2	0.023	-0.030	0.023	-0.033	0.022	-0.034	0.021	-0.031	0.021	-0.034	0.022	-0.033
z_3	0.012	-0.026	0.011	-0.026	0.011	-0.026	0.011	-0.026	0.011	-0.026	0.011	-0.027
z_4	0.052	-0.077	0.036	-0.104	0.046	-0.099	0.052	-0.077	0.033	-0.103	0.029	-0.094
z_5	0.071	-0.091	0.011	-0.076	0.023	-0.078	0.021	-0.074	0.017	-0.079	0.067	-0.101
z_6	0.069	-0.085	0.068	-0.083	0.068	-0.083	0.068	-0.082	0.067	-0.083	0.068	-0.086
z_7	0.095	-0.073	0.020	-0.023	0.028	-0.025	0.084	-0.040	0.018	-0.024	0.048	-0.043
z_8	0.056	-0.040	0.017	-0.015	0.016	-0.020	0.093	-0.040	0.017	-0.016	0.027	-0.019
z_9	0.024	-0.019	0.023	-0.023	0.021	-0.024	0.023	-0.020	0.023	-0.024	0.024	-0.016
z_{10}	0.016	-0.015	0.019	-0.018	0.018	-0.017	0.017	-0.016	0.019	-0.018	0.024	-0.016
z_{11}	8.964	-10.02	4.093	-3.774	4.392	-3.623	6.047	-14.80	4.134	-3.738	5.211	-6.255
z_{12}	4.584	-6.384	2.257	-2.445	2.103	-1.729	4.629	-7.540	2.162	-1.827	3.059	-4.195
z_{13}	0.999	-0.963	1.172	-0.797	1.240	-0.800	1.191	-0.736	1.269	-0.806	1.310	-1.047

Tabel 3.5: De maximale en minimale waarden voor de te regelen grootheden

De geselecteerde IU sets blijken niet altijd een beter geregeld gedrag te hebben dan niet geselecteerde IU sets. Ook blijkt dat de 2-dimensionale subsystemen een beter geregeld gedrag geven dan 3-dimensionale systemen. Een kanttekening hierbij is, dat met regulaar die per IU set worden ontworpen en daarvoor zo goed mogelijk worden ingesteld de resultaten anders kunnen zijn. Eigenlijk zou ook bekeken moeten worden of voor de geselecteerde IU set de ontworpen regulaars aan de eisen voor de gevoeligheidsfunctie voldoen.

4. Conclusies en Aanbevelingen

Of er een beter geregeld gedrag van de geselecteerde IU sets dan van de niet-geselecteerde IU sets verwacht mag worden is twijfelachtig. De IU selectie gebeurt in het frequentiedomein terwijl de prestatie van het *geregelde gedrag* in het tijddomein bekeken wordt. Verder is het voor de IU sets die *niet* aan criterium (2.2) voldoen *niet* mogelijk om een regelaar te ontwerpen die robuust stabiel is voor het systeem met een modelonzekerheid, δ_{ra} , en aan de nominale prestatie-eisen voldoet. In het selectie criterium (2.2) wordt rekening gehouden met *alle* mogelijke modelonzekerheden, met de grootte van δ_{ra} terwijl bij het *geregelde gedrag* gekeken wordt naar een model met een specifieke modelfout ten gevolge van een fout in de dempingscoëfficiënten.

	ongeregeld		$y_6 y_7 y_8/u_1 u_2 u_3$		$y_1 y_8 y_{13}/u_1 u_3 u_4$	
	max	min	max	min	max	min
z_1	0.019	-0.040	0.034	-0.040	0.027	-0.040
z_2	0.020	-0.031	0.032	-0.036	0.019	-0.031
z_3	0.011	-0.027	0.016	-0.025	0.011	-0.027
z_4	0.048	-0.068	0.037	-0.086	0.043	-0.077
z_5	0.065	-0.081	0.027	-0.064	0.064	-0.084
z_6	0.064	-0.079	0.030	-0.076	0.031	-0.079
z_7	0.075	-0.050	0.029	-0.030	0.052	-0.037
z_8	0.041	-0.027	0.021	-0.019	0.047	-0.048
z_9	0.027	-0.020	0.026	-0.023	0.026	-0.019
z_{10}	0.015	-0.014	0.017	-0.017	0.015	-0.017
z_{11}	8.369	-10.657	6.340	-5.737	7.681	-5.601
z_{12}	2.833	-3.634	2.721	-1.737	7.804	-7.248
z_{13}	1.160	-1.105	1.644	-1.127	1.215	-1.143

Tabel 3.6: De maximale en minimale waarden voor de te regelen grootheden

HOOFDSTUK 4

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

4.1 CONCLUSIES

Bij de IU selectie methode van Reeves moet elke te regelen grootheid door één meting vertegenwoordigd worden en de prestatie-eisen voor die te regelen grootheid moeten vertaald kunnen worden naar zinvolle eisen aan de corresponderende meting, wil het systeem aan de prestatie-eisen kunnen voldoen. Dit brengt de systematiek van de IU selectiemethode in gevaar, aangezien het bepalen van deze meting op inzicht gebeurt.

Door δ_{ra} voor alle IU set afzonderlijk te bepalen en frequentie-afhankelijk te maken ontstaat een eerlijkere onderlinge vergelijking van de IU sets. Subsystemen met een kleinere modelfout dan een vaste gespecificeerde maximaal modelfout (zoals Reeves het doet) kan hierdoor wel aan het selectie criterium voldoen.

De reden die Reeves voor een schalingsonafhankelijk criterium geeft is twijfelachtig, omdat verwacht wordt dat door goede schaling van P^* , automatisch de subsystemen goed geschaald zijn.

Bij het toepassen van de IU selectiemethode van Reeves op een trekker-oplegger combinatie komen niet de IU sets naar voren die een duidelijk beter geregeld gedrag hebben. Het geregelde gedrag van niet- geselecteerde IU sets blijkt even goed te kunnen zijn als dat van een geselecteerd subsysteem. Een verklaring hiervoor is dat de IU selectiemethode uitgaat van alle mogelijke modelfouten met de grootte van δ_{ra} terwijl het geregelde gedrag bekeken wordt van een systeem met een specifieke modelfout, δ_{ra} , ten gevolge van een fout in de dempingscoëfficiënten.

4.2 AANBEVELINGEN

Onderzoek uitvoeren naar toepassing van de IU selectiemethode van Reeves waar er een keus is uit meerdere metingen en ingangen voor één bepaald regeldoel. Een mogelijkheid zou een distillatiekolom kunnen zijn, waar bijvoorbeeld de keuze is tussen een veelheid aan temperatuur- en drukmetingen om produktconcentraties te regelen.

Onderzoeken of het zin heeft om σ_s en ω_s voor iedere IU set afzonderlijk en frequentie afhankelijk te specificeren, omdat andere metingen en lage - of hoge frequenties andere eisen aan de gevoeligheidsfunctie tot gevolg kunnen hebben

Onderzoeken of de geselecteerde IU sets van de trekker-oplegger combinatie aan de eisen voor de gevoeligheidsfunctie (gebruikt bij de selectie) kunnen voldoen.

4. Conclusies en Aanbevelingen

Onderzoek uitvoeren naar een selectiemethode die ook voor niet-vierkante systemen gebruikt kan worden, omdat bijvoorbeeld de in [3] gebruikte IU set bestaat uit 4 metingen en 1 ingang.

Onderzoek naar een selectiemethode die gegeven de prestaties-eisen, *die* metingen en ingangen selecteert waarmee die prestatie-eisen gehaald kunnen worden. Hierbij zou kunnen worden uitgegaan van de eisen voor robuuste prestatie, zie bijvoorbeeld [5].

REFERENTIES

- [1] S. P. Boyd en C. H. Barratt, "Linear controller design: Limits of performance", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1991
- [2] N. Geerts, "Control configuration design", WFW rapport 94.005, Technische Universiteit Eindhoven, februari 1994
- [3] R. Huisman, "A controller and observer for active suspensions with preview", proefschrift, Technische Universiteit Eindhoven, 1994
- [4] B. de Jager, "Multiobjective suspension control problem", in Proc. van de IEEE Conference on Decision and Control, december 1995, te verschijnen
- [5] J. H. Lee, R. D. Braatz, M. Morari en A. Packard, "Screening tools for robust control structure selection", Automatica 31(2):229-235, februari 1995
- [6] J. M. Maciejowski, "Multivariable feedback design", Addison-Wesley, Amsterdam 1989
- [7] D. E. Reeves, "A comprehensive approach to control configuration design for complex systems", proefschrift, Georgia Institute of Technology, 1991
- [8] D. E. Reeves, C. Nett en Y. Arkun, "Control configuration design toolbox for use with MATLAB", handleiding, versie 1.0, mei 1991
- [9] M. van de Wal, "Control structure design for dynamic systems: A review", WFW rapport 94.084, Technische Universiteit Eindhoven, september 1994
- [10] M. van de Wal, "Control structure design for the 6 DOF tractor-semitrailer example: Application of the Matlab Control Configuration Design Toolbox", WFW rapport 95.124, Technische Universiteit Eindhoven, maart 1995
- [11] M. van de Wal en B. de Jager, "A survey of methods for control structure design", Automatica, september 1995, ingediend

BIJLAGE 1**HET TREKKER-OPLEGGER MODEL**

In deze bijlage staan de afbeeldingen van de trekker-oplegger combinatie met daar in de parameters (Figuur b.1) en de toestandsgrootheden (Figuur b.2). Verder zijn de systeemmatrices, van het gebruikte model van de trekker- oplegger combinatie weergegeven.

Voor de hierin voorkomende parameters geldt:

De veerconstantes in [N/m]:

$$\begin{array}{llll}
 k_{tf} = 2.5 \text{ e}6 & k_{tr} = 5.0 \text{ e}6 & k_{tt} = 1.0 \text{ e}7 & \\
 k_{sf} = 5.0 \text{ e}5 & k_{sr} = 5.0 \text{ e}5 & k_{st} = 1.5 \text{ e}6 & \\
 k_{mf} = 1.0 \text{ e}6 & k_{mr} = 2.0 \text{ e}4 & & \\
 k_{cbf} = 5.0 \text{ e}4 & k_{cbp} = 1.0 \text{ e}5 & &
 \end{array}$$

De dempingsconstantes in [Ns/m]:

$$\begin{array}{llll}
 b_{sf} = 5.0 \text{ e}4 & b_{sr} = 5.0 \text{ e}4 & b_{st} = 1.0 \text{ e}5 & \\
 b_{mf} = 2.0 \text{ e}3 & b_{mr} = 3.0 \text{ e}3 & & \\
 b_{cbf} = 6.0 \text{ e}3 & b_{cbp} = 6.0 \text{ e}3 & &
 \end{array}$$

De massa's in [kg]:

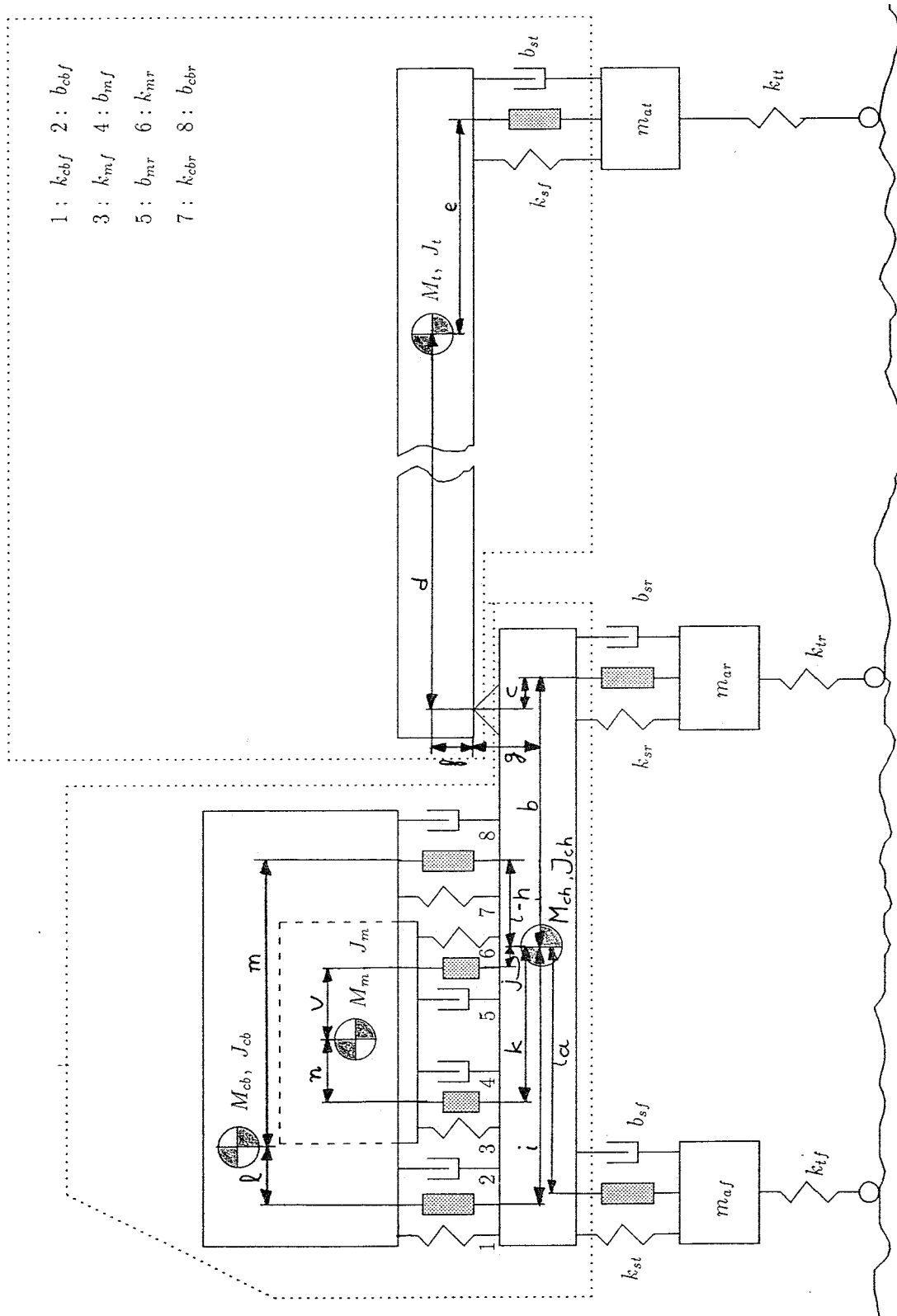
$$\begin{array}{llllll}
 m_{af} = 1.0 \text{ e}3 & m_{ar} = 1.5 \text{ e}3 & m_{at} = 2.0 \text{ e}3 & & & \\
 M_m = 2.0 \text{ e}3 & M_{ch} = 4.0 \text{ e}3 & M_{cb} = 1.0 \text{ e}3 & M_t = 3.0 \text{ e}4 & &
 \end{array}$$

De massatraagheden in [kg m²]:

$$J_m = 7.0 \text{ e}2 \quad J_{ch} = 7.5 \text{ e}3 \quad J_{cb} = 5.0 \text{ e}2 \quad J_t = 3.0 \text{ e}5$$

De geometrische parameters in [m]:

$$\begin{array}{llll}
 a = 0.9 & b = 2.6 & c = 0.6 & d = 4.7 \\
 e = 2.8 & f = 2.3 & g = 0.1 & h = 0.8 \\
 i = 2.2 & j = 0.3 & k = 1.5 & l = 0.7 \\
 m = 0.7 & n = 0.7 & o = 0.5 &
 \end{array}$$



Figuur b.1: De trekker-oplegger combinatie met daarin alle parameters weergegeven

$$K = \begin{bmatrix} k_{tf} + k_{sf} & 0 & 0 & -k_{sf} & ak_{sf} \\ 0 & k_{tr} + k_{sr} & 0 & -k_{sr} & -bk_{sr} \\ 0 & 0 & k_{tt} + k_{st} & -k_{st} & -(b-c)k_{st} \\ -k_{sf} & -k_{sr} & -k_{st} & k_{44} & k_{45} \\ ak_{sf} & -bk_{sr} & -(b-c)k_{st} & k_{45} & k_{55} \\ 0 & 0 & -(d+e)k_{st} & (d+e)k_{st} & (d+e)(b-c)k_{st} \\ 0 & 0 & 0 & -k_{cbf} - k_{cbr} & ik_{cbf} + hk_{cbr} \\ 0 & 0 & 0 & lk_{cbf} - mk_{cbr} & -ilk_{cbf} + hmk_{cbr} \\ 0 & 0 & 0 & -k_{mf} - k_{mr} & kk_{mf} + jk_{mr} \\ 0 & 0 & 0 & nk_{mf} - ok_{mr} & -knk_{mf} + jok_{mr} \\ \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -(d+e)k_{st} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (d+e)k_{st} & -k_{cbf} - k_{cbr} & lk_{cbf} - mk_{cbr} & -k_{mf} - k_{mr} & nk_{mf} - ok_{mr} \\ (b-c)(d+e)k_{st} & ik_{cbf} + hk_{cbr} & -ilk_{cbf} + hmk_{cbr} & kk_{mf} + jk_{mr} & -knk_{mf} + jok_{mr} \\ (d+e)^2 k_{st} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{cbf} + k_{cbr} & -lk_{cbf} + mk_{cbr} & 0 & 0 \\ 0 & -lk_{cbf} + mk_{cbr} & l^2 k_{cbf} + m^2 k_{cbr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{mf} + k_{mr} & -nk_{mf} + ok_{mr} \\ 0 & 0 & 0 & -nk_{mf} + ok_{mr} & n^2 k_{mf} + o^2 k_{mr} \end{bmatrix}$$

Hierin geldt voor:

$$\begin{aligned} k_{44} &= k_{sf} + k_{sr} + k_{st} + k_{cbf} + k_{cbr} + k_{mf} + k_{mr} \\ k_{45} &= -a \times k_{sf} + b \times k_{sr} + (b-c) \times k_{st} - i \times k_{cbf} - h \times k_{cbr} - k \times k_{mf} - j \times k_{mr} \\ k_{55} &= a^2 \times k_{sf} + b^2 \times k_{sr} + (b-c)^2 \times k_{st} + i^2 \times k_{cbf} + h^2 \times k_{cbr} + k^2 \times k_{mf} + j^2 \times k_{mr} \end{aligned}$$

$$M = \begin{bmatrix} m_{af} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{ar} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{at} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_{ch} + M_t & M_t(b-c) & M_t d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_t(b-c) & J_{ch} + M_t(b-c)^2 + M_t g^2 & M_t(b-c)d + M_t fg & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_t d & M_t(b-c)d + M_t fg & J_t + M_t d^2 + M_t f^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{cb} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{cb} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_m \end{bmatrix}$$

$$u^* = \begin{bmatrix} u_f \\ u_r \\ u_t \\ -u_f - u_r - u_t + u_{cb} + u_m \\ au_f - bu_r - (b-c)u_t - hu_{cb} - ju_m \\ -(d-e)u_t \\ -u_{cb} \\ mu_{cb} \\ -u_m \\ -ou_m \end{bmatrix} = B_u^* u; \quad B_u^* = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ a & -b & -(b-c) & -h & -j \\ 0 & 0 & -(d+e) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -o \end{bmatrix}$$

Met voor u de 5 actuatoren zoals vermeld is in Paragraaf 3.1

$$w^* = \begin{bmatrix} k_{tt} q_{tt} \\ k_{tr} q_{tr} \\ k_{tt} q_{tt} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = B_w^* w, \quad B_w = \begin{bmatrix} k_{tr} & 0 & 0 \\ 0 & k_{tr} & 0 \\ 0 & 0 & k_{tt} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Met voor w de verstoring door het wegdek zoals vermeld is in Paragraaf 3.1

Het systeem kan als volgt in de toestandsvorm geschreven worden:

$$\dot{x} = Ax + B_u u + B_w w$$

Met :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1} K & -M^{-1} B \end{bmatrix}$$

$$B_u = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix} B_u^*; \quad B_w = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix} B_w^*$$

Voor de kandidaat metingen kan geschreven worden:

$$y = Cx + D_u u + D_w w$$

met:

$$C = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix}$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & -a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & (b-c) & (d+e) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & h & 0 & 1 & m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & j & 0 & 0 & 0 & 1 & o & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} A_{11} \\ A_{12} \\ A_{13} \\ A_{14} - aA_{15} \\ A_{14} + bA_{15} \\ A_{14} + (b-c)A_{15} + (d+e)A_{16} \\ A_{17} + mA_{18} \\ A_{19} + oA_{20} \end{bmatrix}$$

In bovenstaande matrix C_2 en het vervolg van de bijlage wordt gebruik gemaakt van de notatie Z_i . Met i de i -de rij van Z .

$$D_u = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ B_{u_{11}} \\ B_{u_{12}} \\ B_{u_{13}} \\ B_{u_{14}} - aB_{u_{15}} \\ B_{u_{14}} + bB_{u_{15}} \\ B_{u_{14}} + (b-c)B_{u_{15}} + (d+e)B_{u_{16}} \\ B_{u_{17}} + mB_{u_{18}} \\ B_{u_{19}} + oB_{u_{20}} \end{bmatrix}; \quad D_w = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ B_{w_{11}} \\ B_{w_{12}} \\ B_{w_{13}} \\ B_{w_{14}} - aB_{w_{15}} \\ B_{w_{14}} + bB_{w_{15}} \\ B_{w_{14}} + (b-c)B_{w_{15}} + (d+e)B_{w_{16}} \\ B_{w_{17}} + mB_{w_{18}} \\ B_{w_{19}} + oB_{w_{20}} \end{bmatrix}$$

Voor de te regelen grootheden kan geschreven worden:

$$z = Ex + F_u u + F_w w$$

met:

$$E = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix}; \quad E_2 = \begin{bmatrix} A_{17} \\ A_{18} \\ A_{16} \end{bmatrix}$$

$$E_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & -a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & (b-c) & (d+e) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & i & 0 & 1 & -l & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & h & 0 & 1 & m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & k & 0 & 0 & 0 & 1 & -n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & j & 0 & 0 & 0 & 1 & o & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$F_u = \begin{bmatrix} F_{u_1} \\ F_{u_2} \end{bmatrix}; \quad F_{u_2} = \begin{bmatrix} B_{u_{17}} \\ B_{u_{18}} \\ B_{u_{16}} \end{bmatrix}$$

F_{u_1} is een nulmatrix met 10 rijen en 5 kolomen

$$F_w = \begin{bmatrix} F_{w_1} \\ F_{w_2} \\ F_{w_3} \end{bmatrix}; \quad F_{w_1} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}; \quad F_{w_3} = \begin{bmatrix} B_{u_{17}} \\ B_{u_{18}} \\ B_{u_{16}} \end{bmatrix}$$

F_{w_1} is een nulmatrix met 7 rijen en 3 kolomen

BIJLAGE 2

BEWIJS VAN SCHALINGSAFHANKELIJKHEID VAN S EN δ_{RA}

Bij schaling van y en dus van r en d geldt met S_y als diagonale schalingmatrix van de ingangen en S_u van de uitgangen:

$$\begin{aligned} 1) \mathbf{y}_s &= S_y \mathbf{y} & \Leftrightarrow & \mathbf{y} = S_y^{-1} \mathbf{y}_s \\ 2) \mathbf{r}_s &= S_y \mathbf{r} & \Leftrightarrow & \mathbf{r} = S_y^{-1} \mathbf{r}_s \\ 3) \mathbf{d}_s &= S_y \mathbf{d} & \Leftrightarrow & \mathbf{d} = S_y^{-1} \mathbf{d}_s \end{aligned}$$

SCHALINGSAFHANKELIJKHEID VOOR DE GEVOELIGHEIDSFUNCTIE

Voor een ongeschaald systeem geldt: $\mathbf{y} = \mathbf{d} + PC(\mathbf{r} - \mathbf{y})$

$$\text{met } \mathbf{r} = 0 \Rightarrow \mathbf{y} = (\mathbf{I} + PC)^{-1} \mathbf{d} \Leftrightarrow \mathbf{y} = \mathbf{S} \mathbf{d}$$

Wat gebeurt er bij schaling nu met S (de gevoeligheidsfunctie)?

$$(\mathbf{I} + PC) \mathbf{y} = \mathbf{d} \Leftrightarrow (\mathbf{I} + PC) S_y^{-1} \mathbf{y}_s = S_y^{-1} \mathbf{d}_s$$

$$S_y^{-1} \mathbf{y}_s + PC S_y^{-1} \mathbf{y}_s = S_y^{-1} \mathbf{d}_s \Leftrightarrow \mathbf{y}_s + S_y PC S_y^{-1} \mathbf{y}_s = \mathbf{d}_s$$

$$\mathbf{y}_s = (\mathbf{I} + S_y PC S_y^{-1})^{-1} \mathbf{d}_s \Leftrightarrow \mathbf{y}_s = \mathbf{S}_s \mathbf{d}_s$$

Aangezien $(\mathbf{I} + S_y PC S_y^{-1})^{-1} \neq (\mathbf{I} + PC)^{-1}$ voor MIMO systemen is de gevoeligheidsfunctie, S dus schalings afhankelijk

SCHALINGSAFHANKELIJKHEID VOOR δ_{ra}

Voor een geschaald systeem geldt:

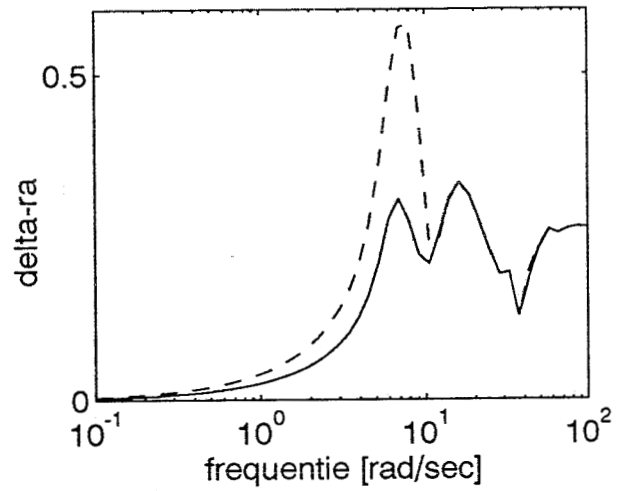
$$\mathbf{y} = \mathbf{d} + P\mathbf{u} \Leftrightarrow S_y^{-1} \mathbf{y}_s = S_y^{-1} \mathbf{d}_s + P S_u^{-1} \mathbf{u}_s$$

$$\mathbf{y}_s = \mathbf{d}_s + S_y P S_u^{-1} \mathbf{u}_s \Leftrightarrow \mathbf{y}_s = \mathbf{d}_s + P_s \mathbf{u}_s$$

Voor δ_{ra} geldt bij schaling:

$$\frac{\bar{\sigma}(\Delta)}{\underline{\sigma}(P_0)} = \frac{\bar{\sigma}(P-P_0)}{\underline{\sigma}(P_0)} \neq \frac{\bar{\sigma}(P_s-P_{0_s})}{\underline{\sigma}(P_{0_s})} = \frac{\bar{\sigma}(S_y^{-1}(P-P_0)S_u)}{\underline{\sigma}(S_y^{-1}P_0S_u)}$$

Dus δ_{ra} schalingafhankelijk. Dit blijkt ook uit Figuur 1.

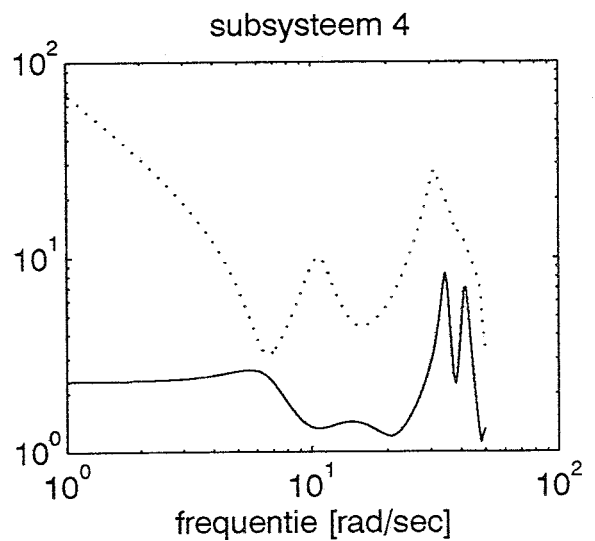
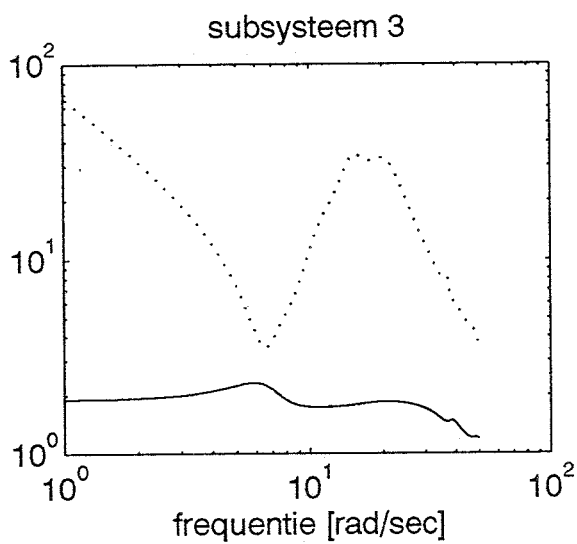
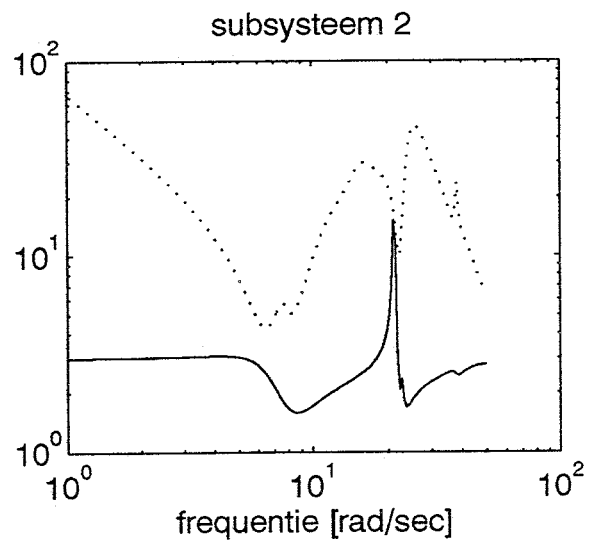
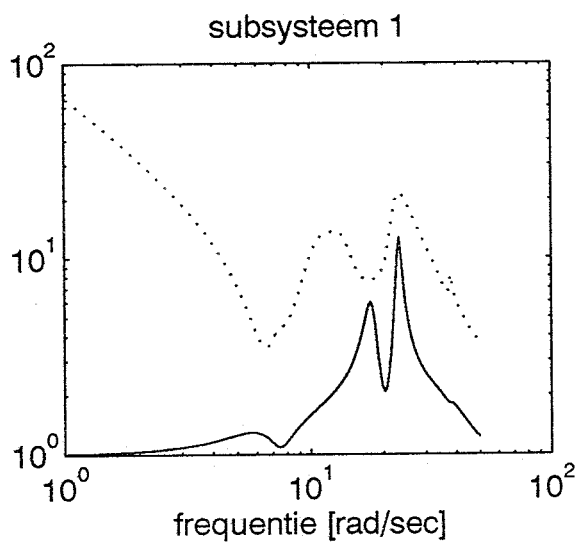


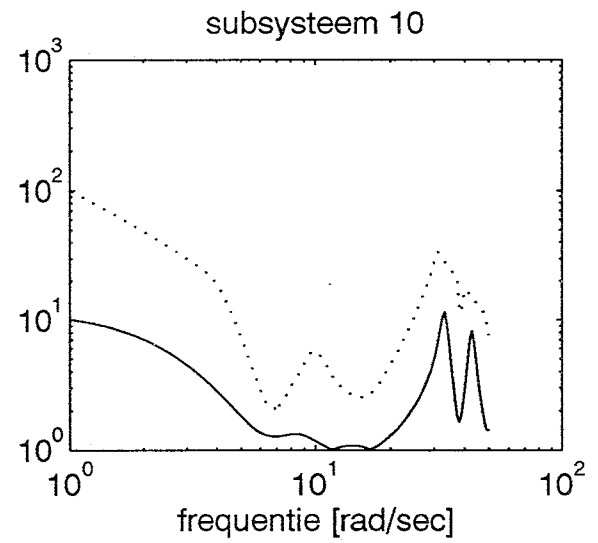
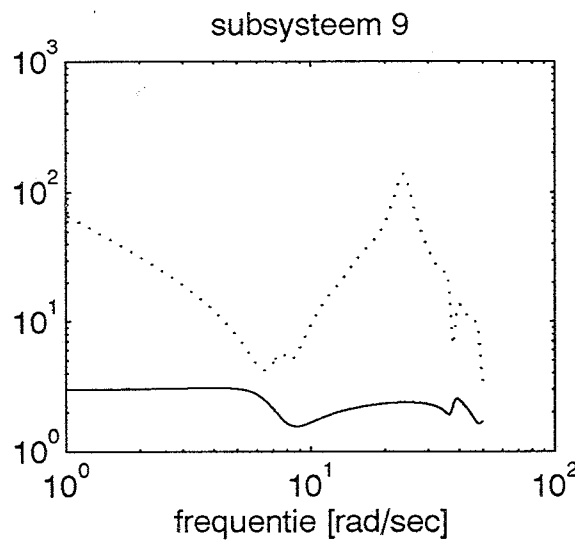
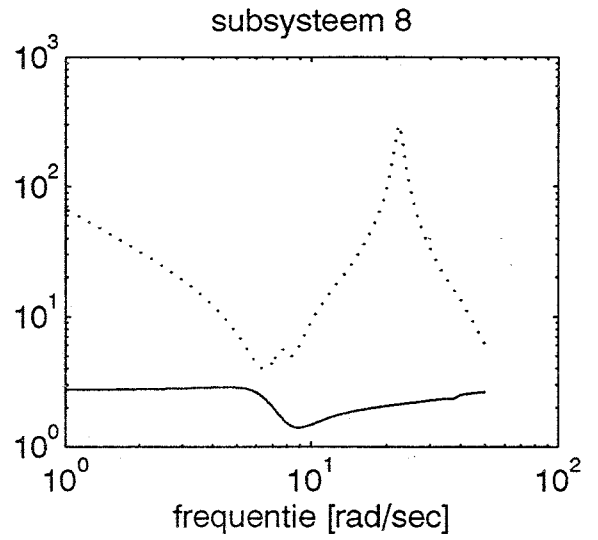
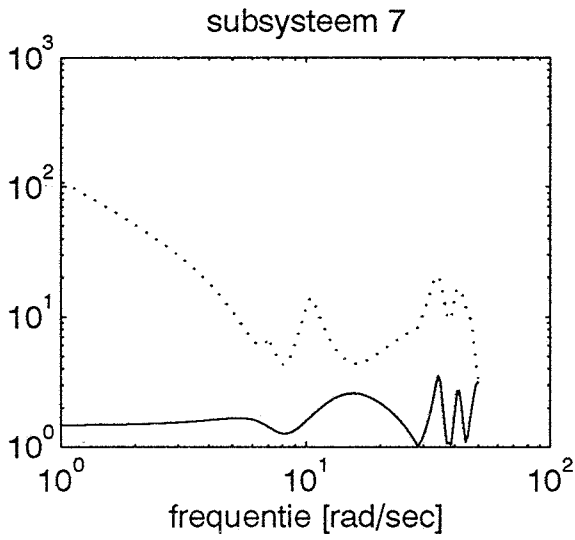
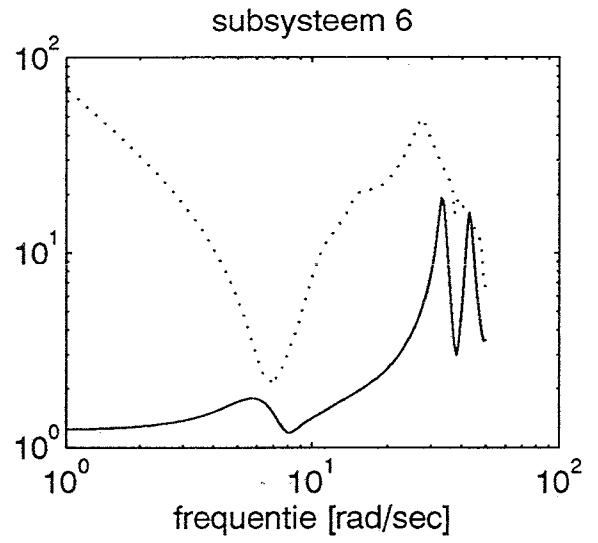
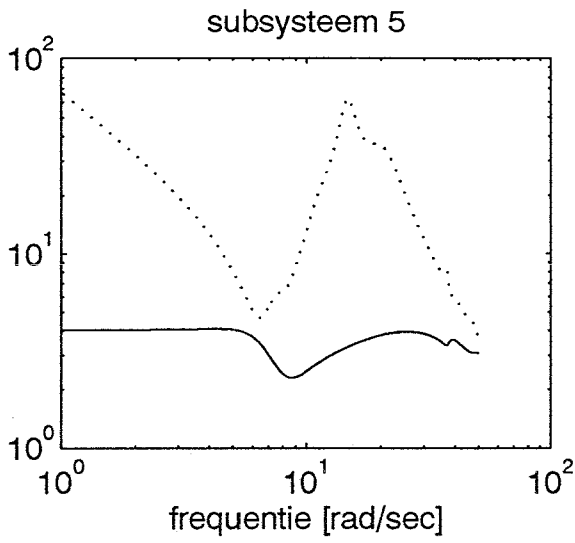
Figuur 3.3: De grote van δ_{ra} voor het subsysteem y_3 $y_{12} / u_1 u_2$ met (-) zonder schaling en (- -) met schaling van S_y

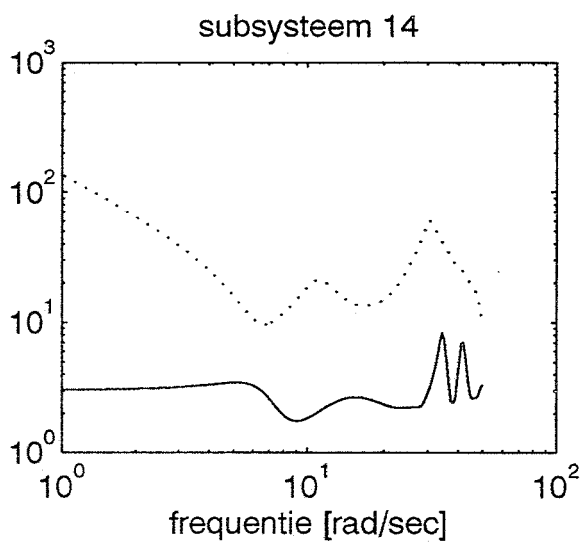
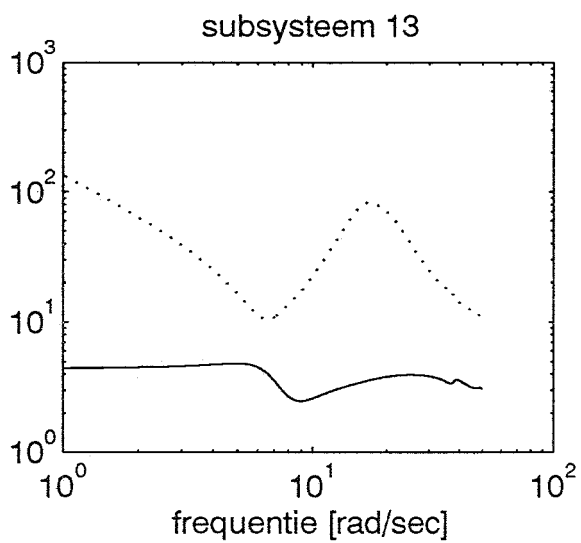
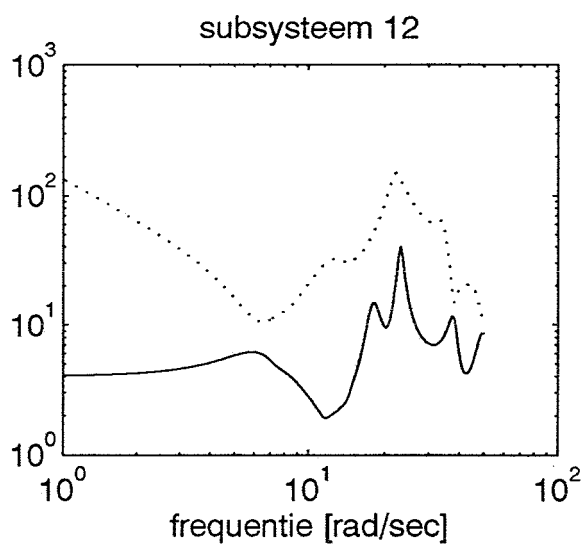
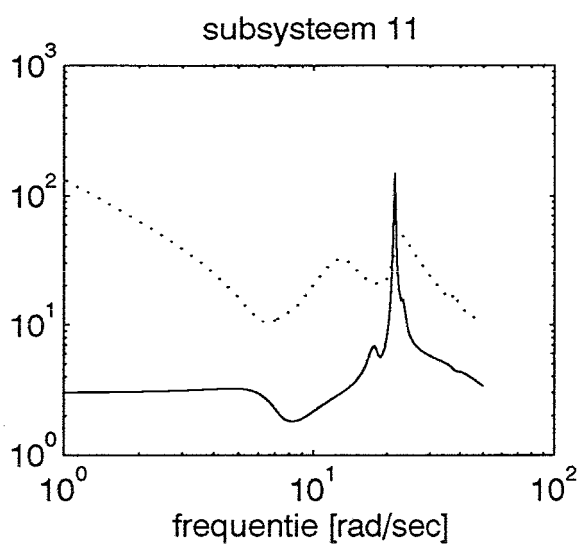
BIJLAGE 3

HET CONDITIEGETAL VOOR GESELECTEERDE IU SETS

Hieronder zijn voor de subsystemen uit Tabel 3.3 de frequentie afhankelijke conditiegetallen uitgezet, samen met het rechterlid. Boven de grafieken staan de nummers van de IU sets vermeld overeenkomstig met Tabel 3.3. Met het conditienummer (-) en de bovengrens (··).







BIJLAGE 4**HET GEREGELDE GEDRAG VAN IU SETS****DE WEEGMATRICES**

$$Q = Q_1 Q_2$$

Q_1 zorgt voor normering van de weeg factoren en heeft op de diagonalen:

[1.0 2.3 1.3 0.79 1.2 2.5 0.86 0.13 0.65 0.56 0.005 0.003 0.096]

Met Q_2 wordt het gewenste gedrag ingesteld en heeft op de diagonalen:

$1.0 \cdot 10^{15}$ [0.001 0.001 0.001 0.02 0.1 0.005 0.01 0.0001 0.001 1.0 6.0 0.004]

In V wordt rekening gehouden met de orde-grootte verschil tussen de meetfout voor de verplaatsings- en versnellingsmetingen. Uit de hier weergegeven V geldt voor alle metingen. Bij het bepalen van de Kalmanversterking K moeten de waarden worden genomen die bij de meting van de IU set horen. V is een matrix met op de diagonalen:

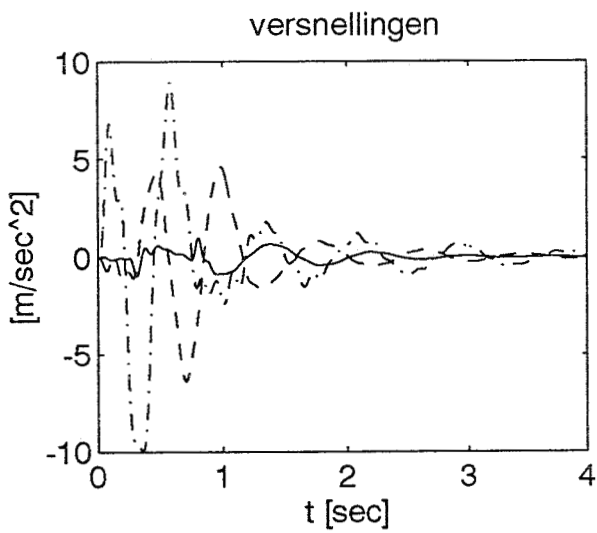
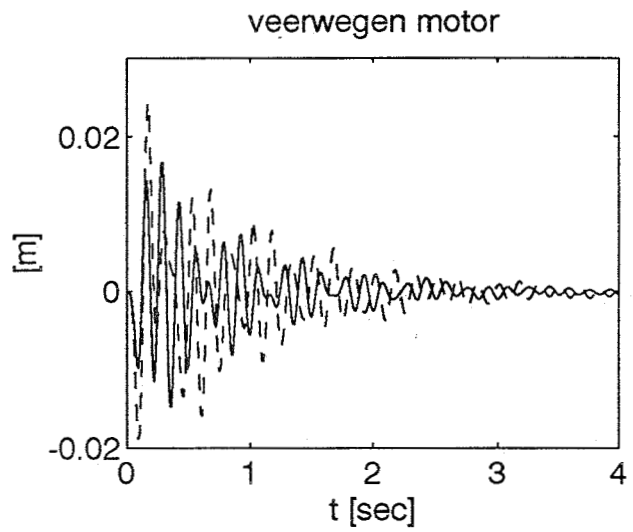
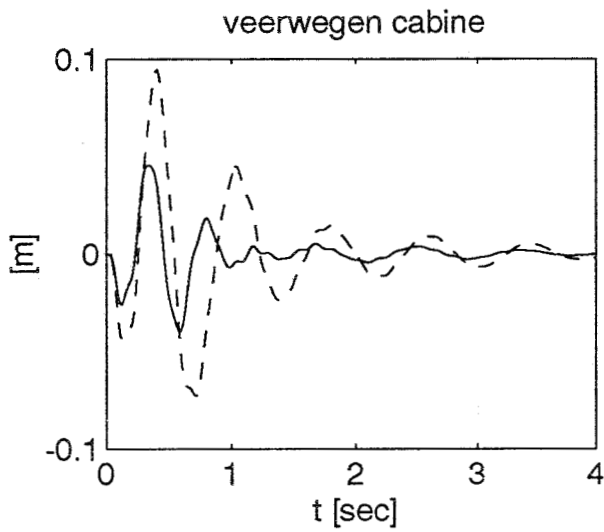
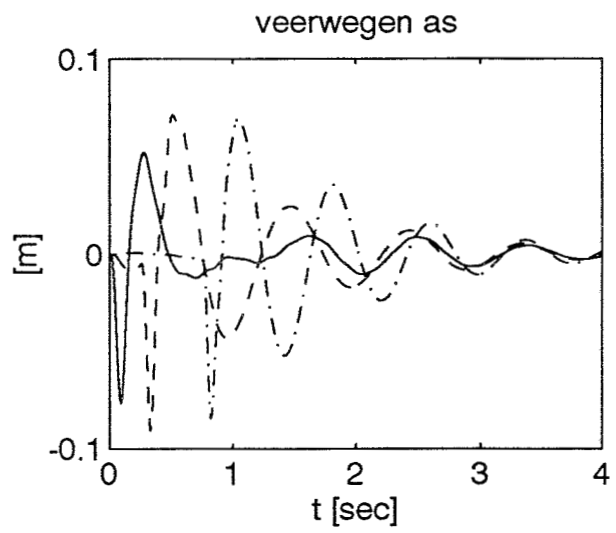
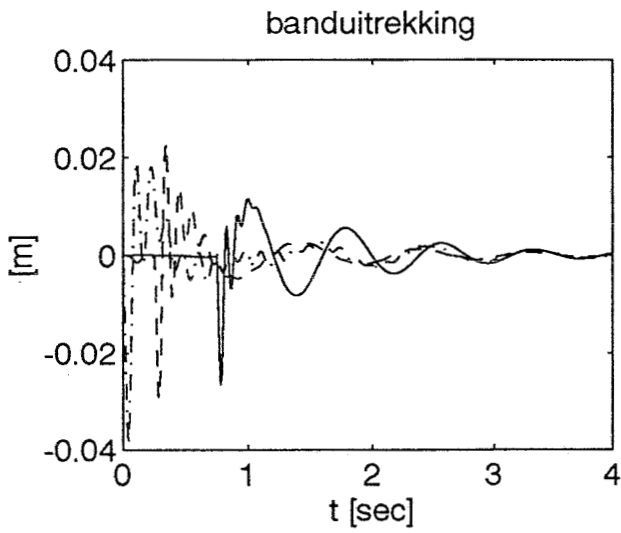
[0.0001 0.0001 0.0001 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1]

DE AFBEELDINGEN

Het geregelde gedrag is per IU set weergegeven op één pagina. In de verschillende figuren zijn de te regelen grootheden uit gezet tegen de tijd en als volgt weergegeven:

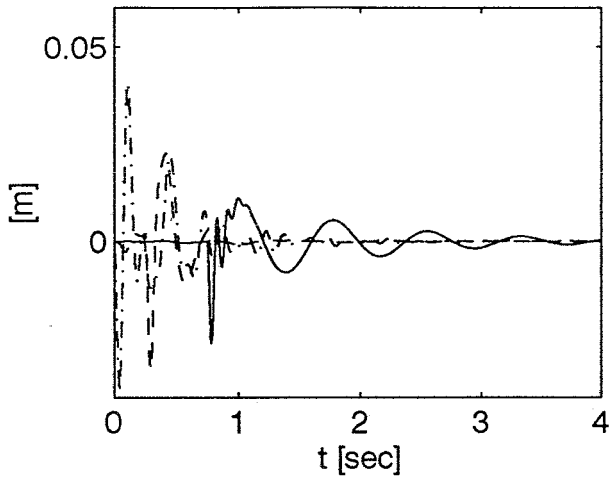
- de banduitrekking in de afbeelding links boven, z_1 (-·), z_2 (--) en z_3 (-)
- de veerwegen bij de as in de afbeelding rechts boven, z_4 (-·), z_5 (--) en z_6 (-)
- de veerwegen bij de cabine in de afbeelding links midden, z_7 (--) en z_8 (-)
- de veerwegen bij de motor in de afbeelding rechts midden, z_9 (--) en z_{10} (-)
- de versnellingen in de afbeelding links beneden, z_{11} (-·), z_{12} (--) en z_{13} (-)
- de ingangen in de afbeelding rechts beneden op volgorde (-·) (--) en (-)

Het passieve systeem met -50% fout in de dempingscoëfficiënten

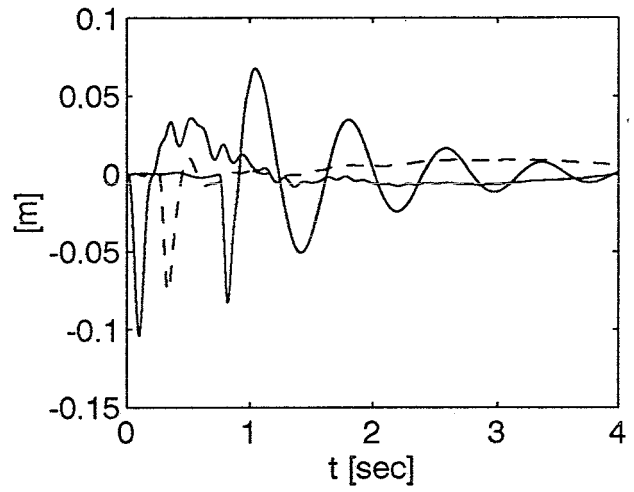


Het geregelde gedrag van IU set $y_1, y_2/u_1, u_2$

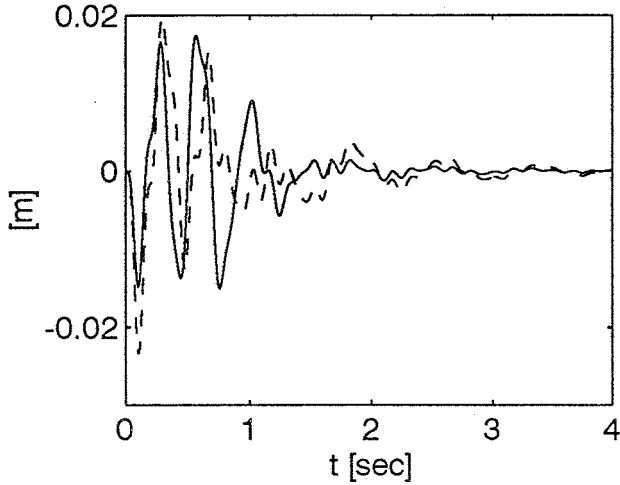
banduitrekking



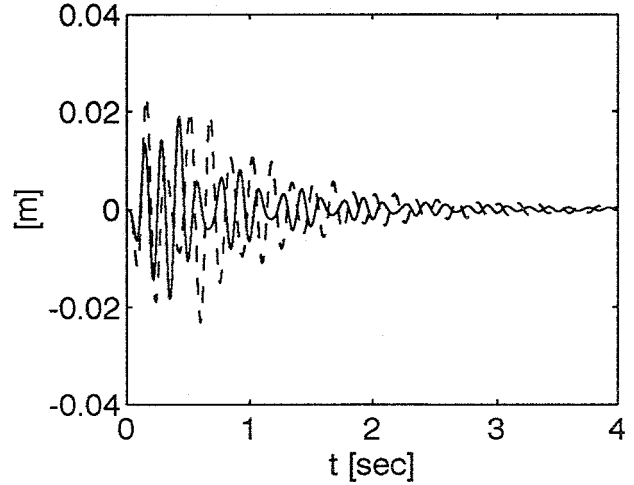
veerwegen as



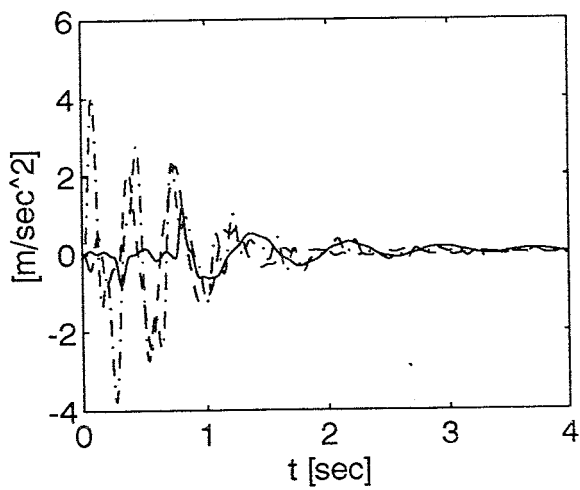
veerwegen cabine



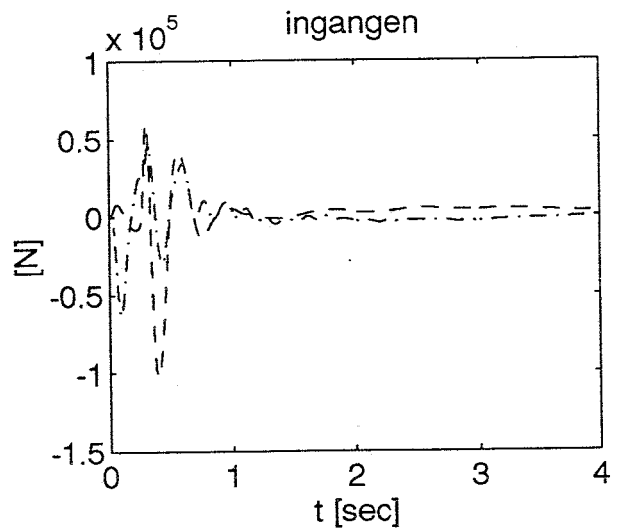
veerwegen motor



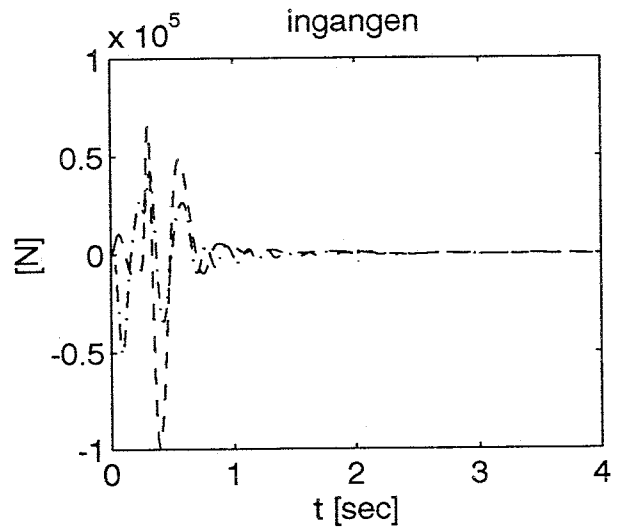
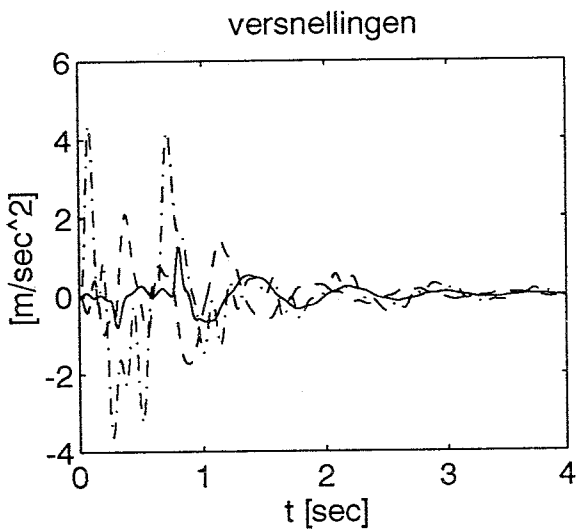
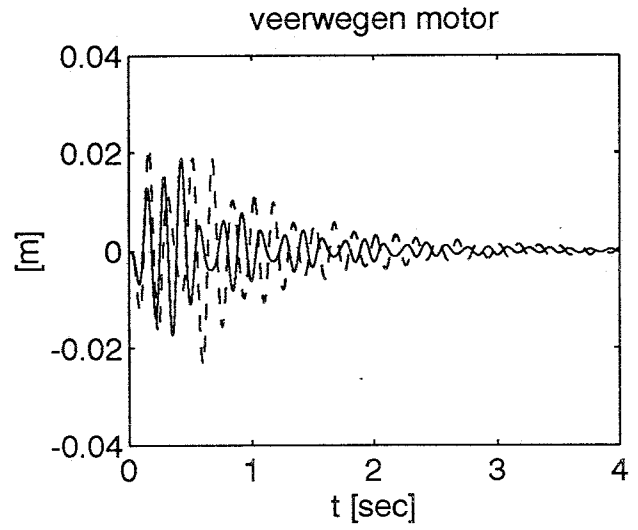
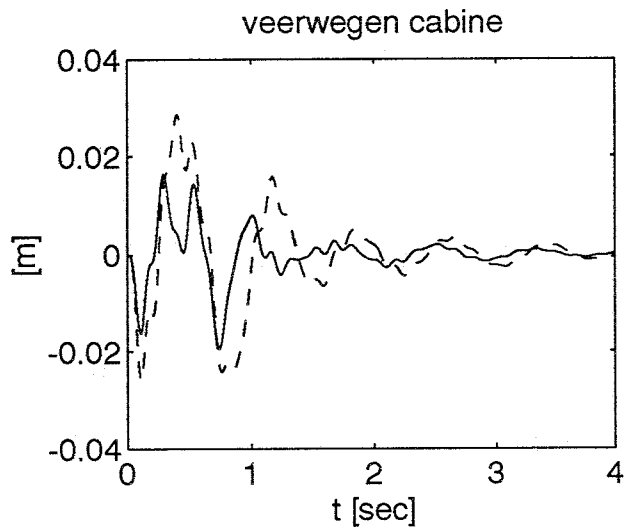
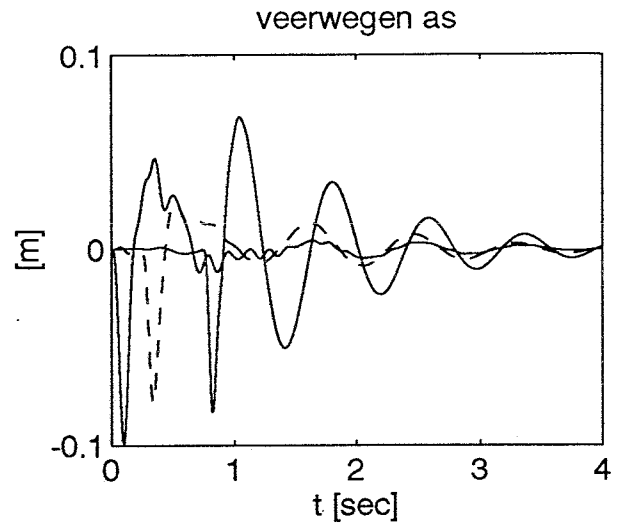
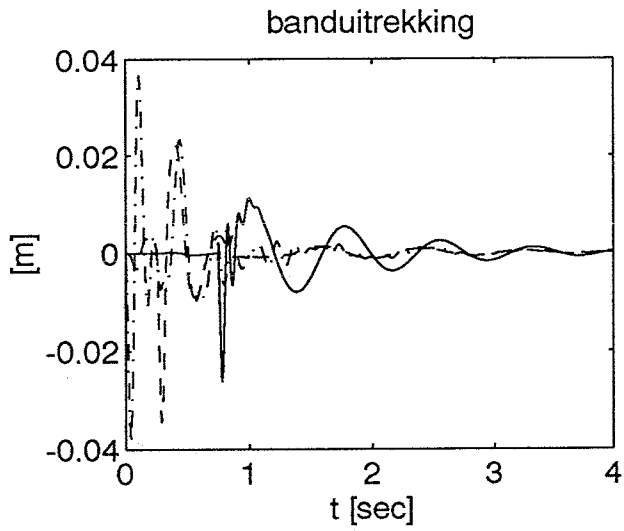
versnellingen



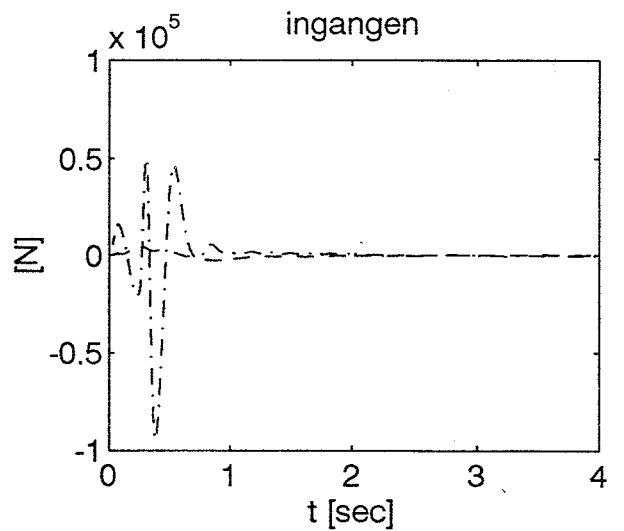
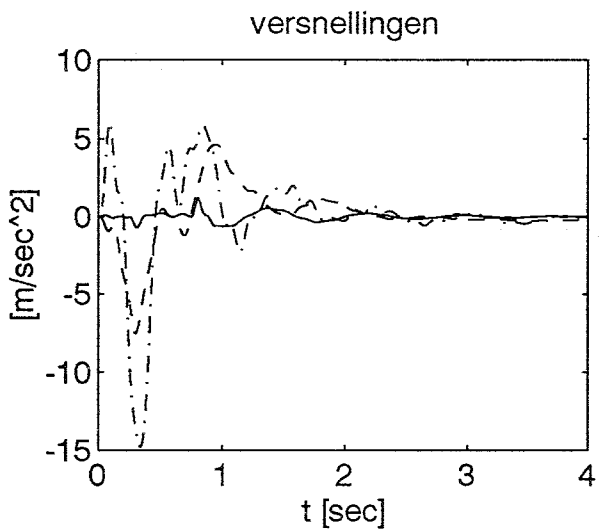
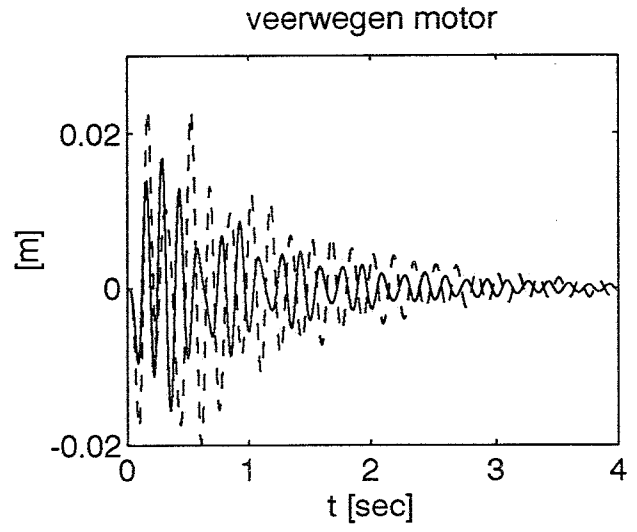
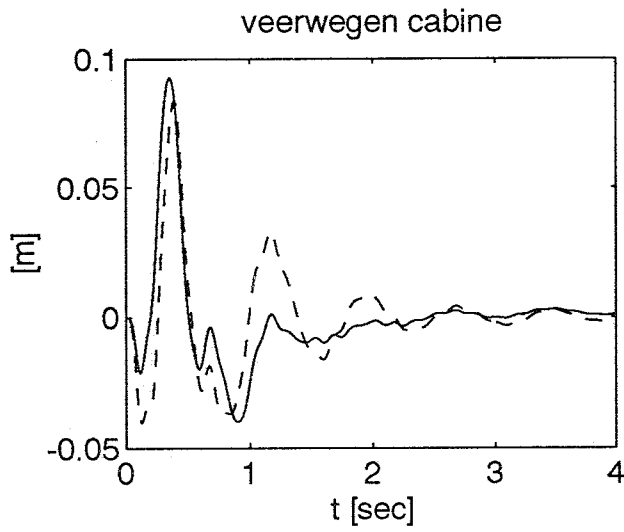
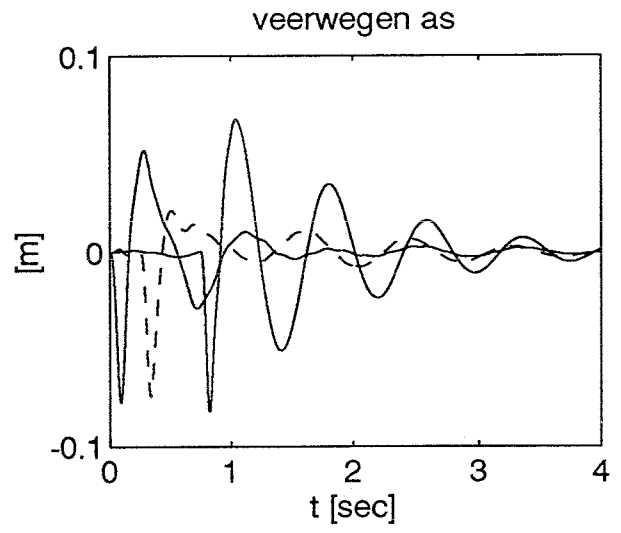
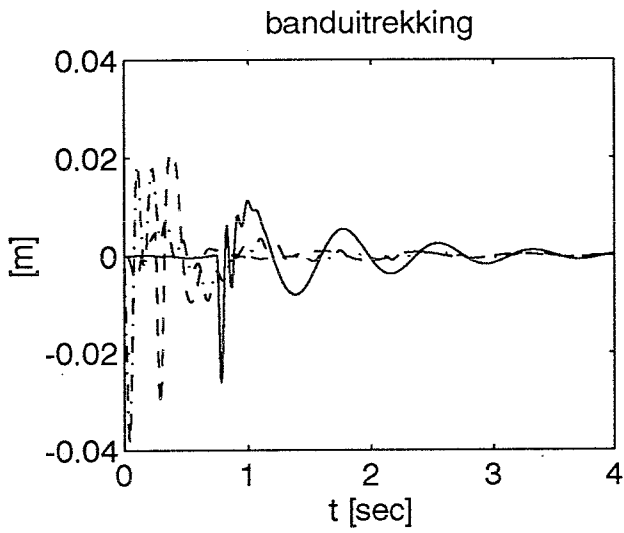
ingangen



Het geregelde gedrag van IU set $y_6 y_7 / u_1 u_2$

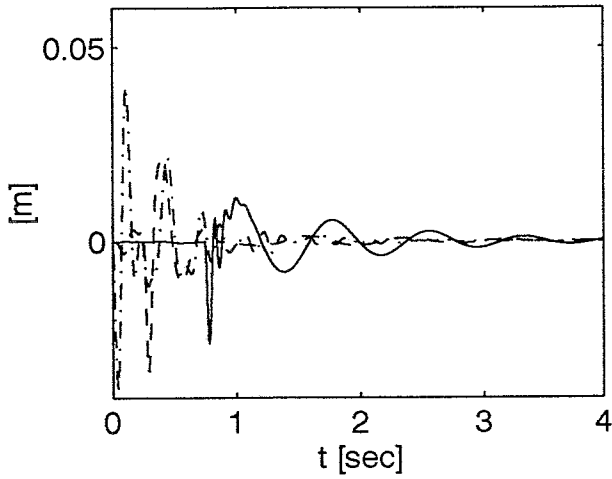


Het geregelde gedrag van IU set $y_6 y_7 / u_2 u_4$

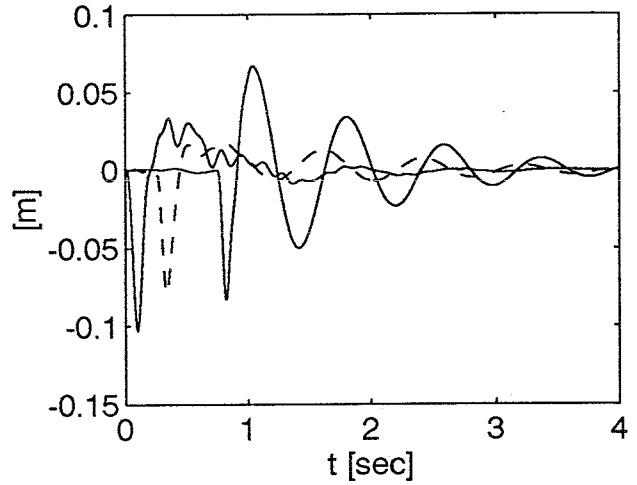


Het geregelde gedrag van IU set $y_1, y_7/u_1, u_2$

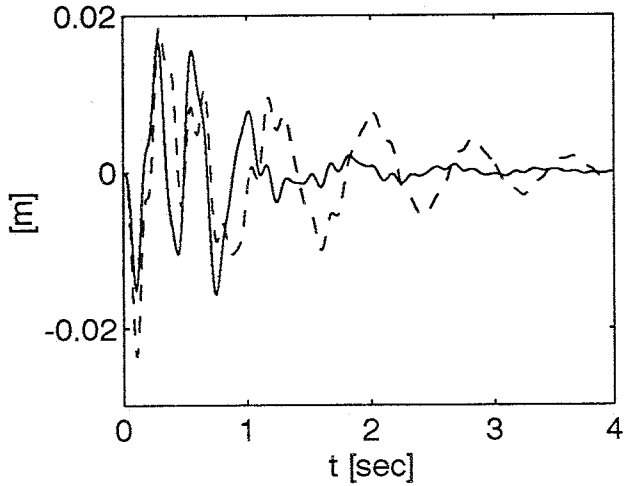
banduitrekking



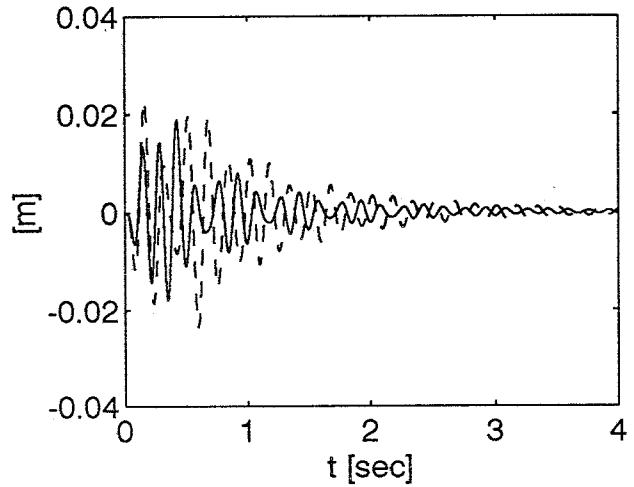
veerwegen as



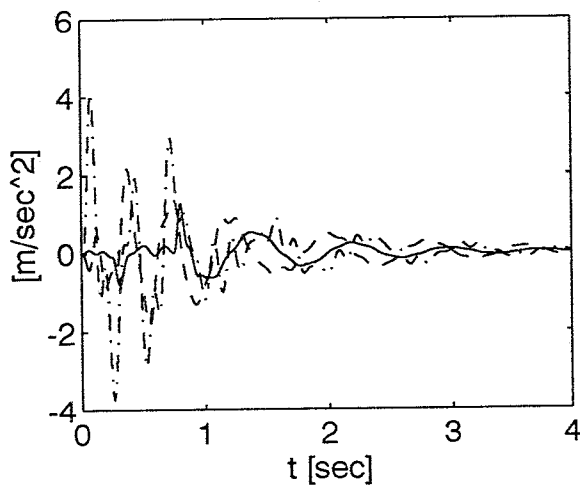
veerwegen cabine



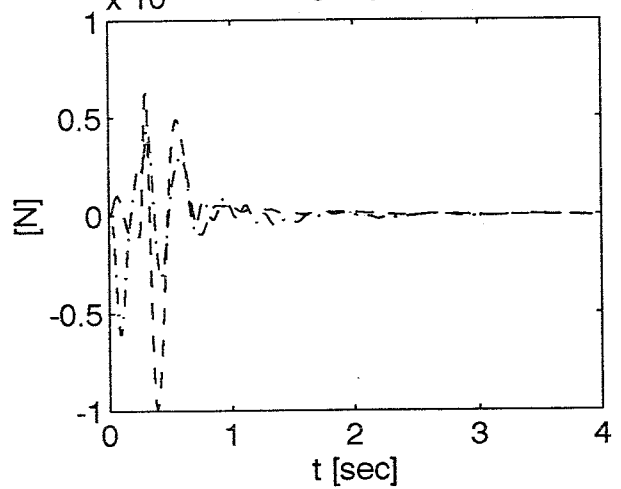
veerwegen motor



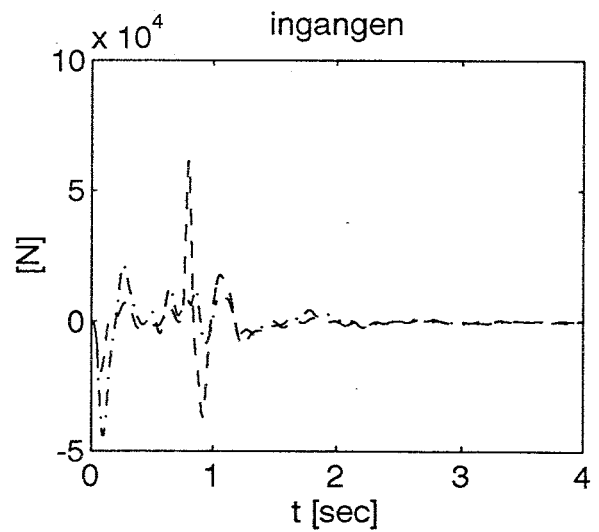
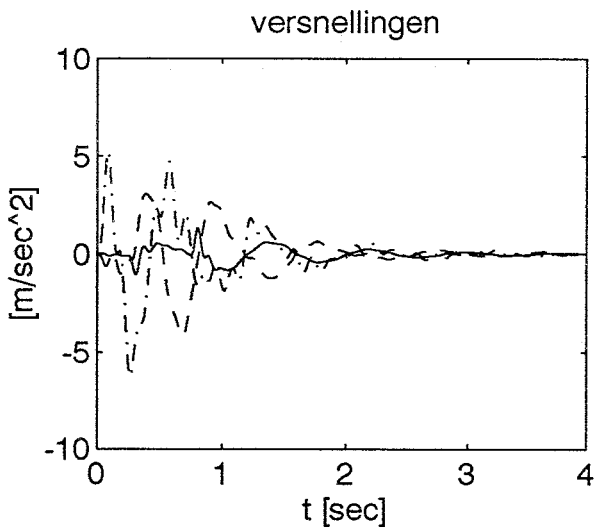
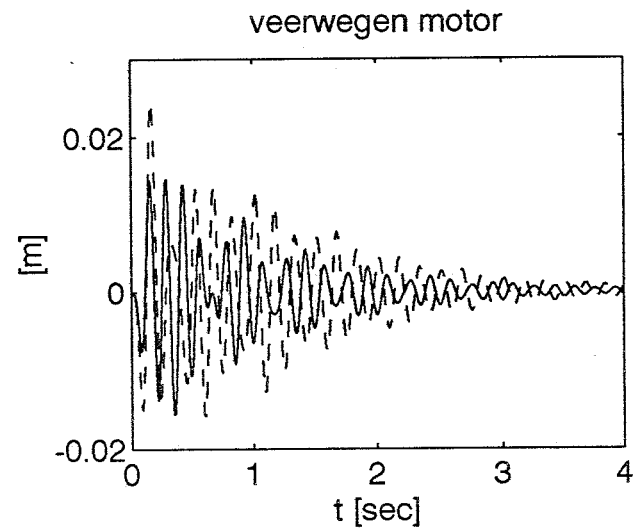
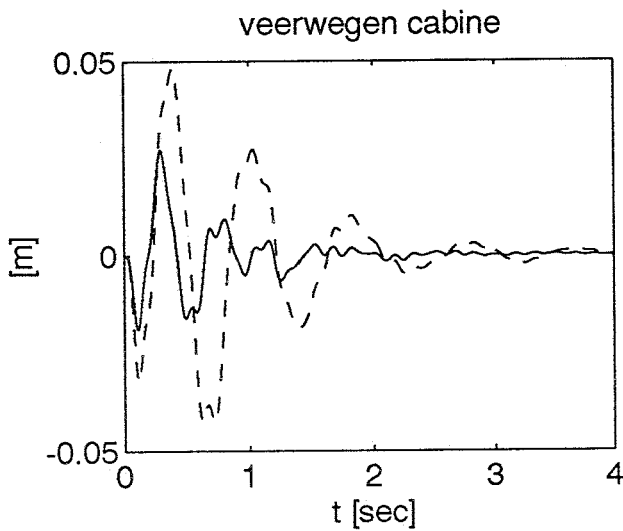
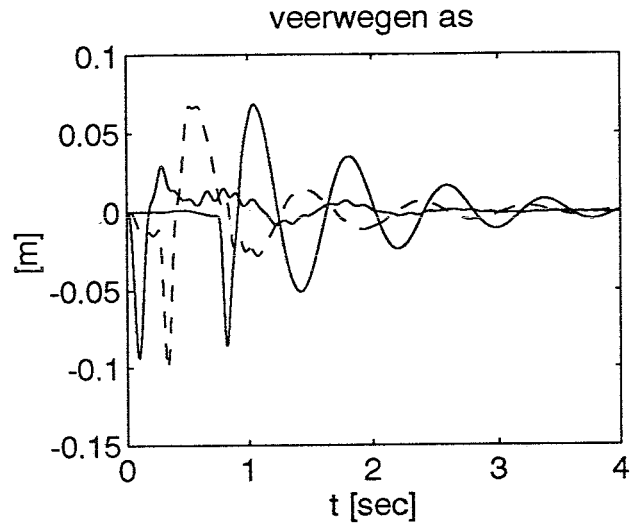
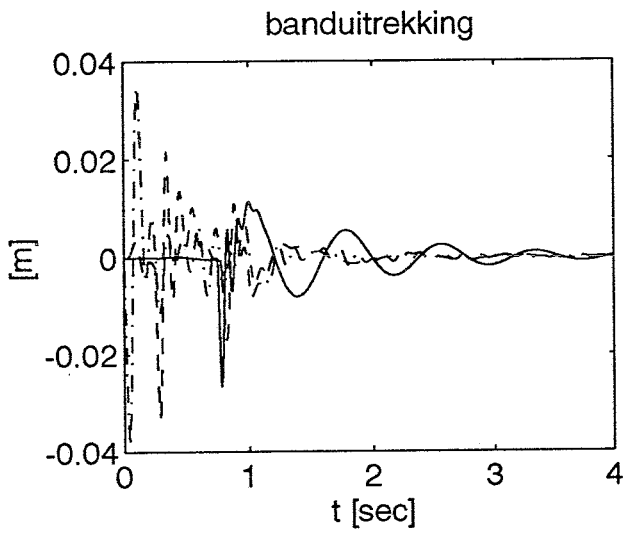
versnellingen



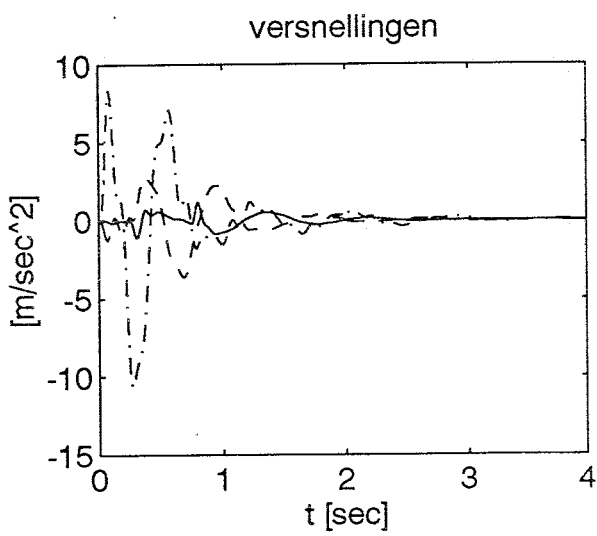
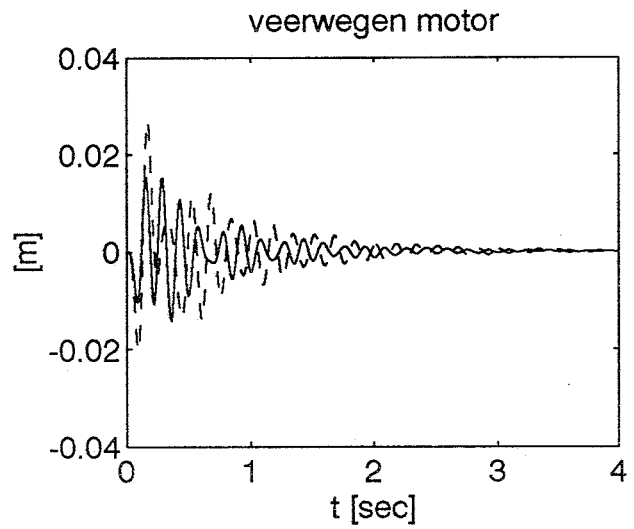
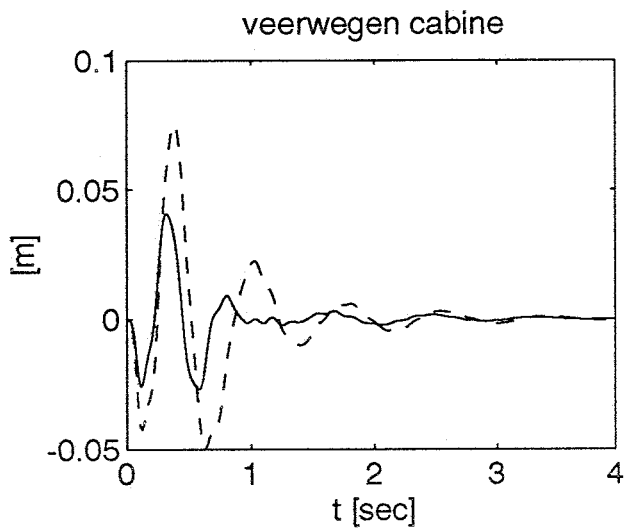
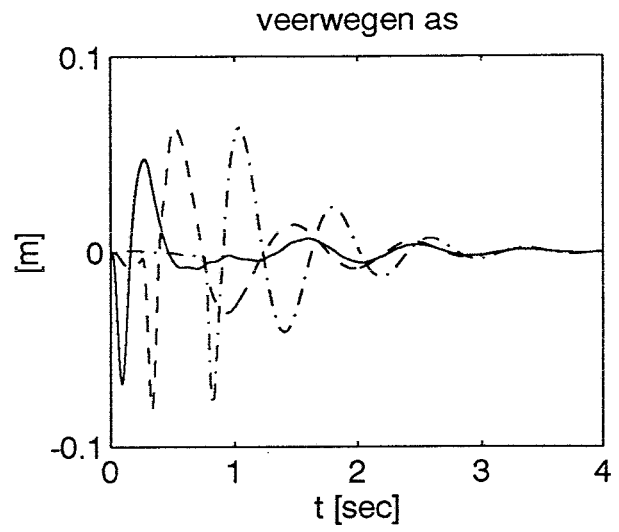
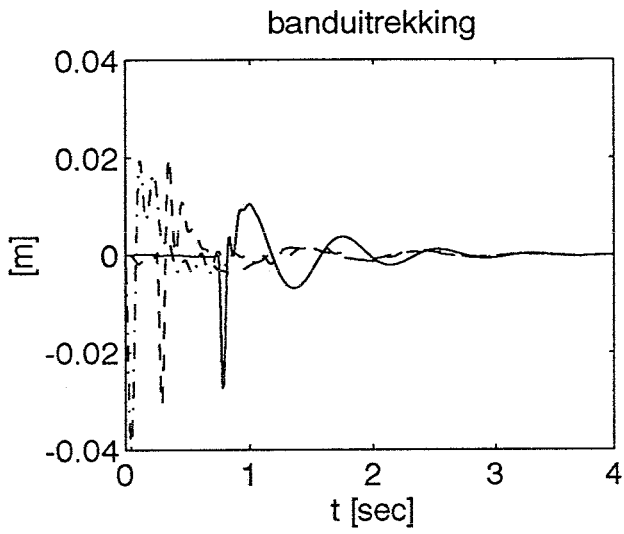
ingangen



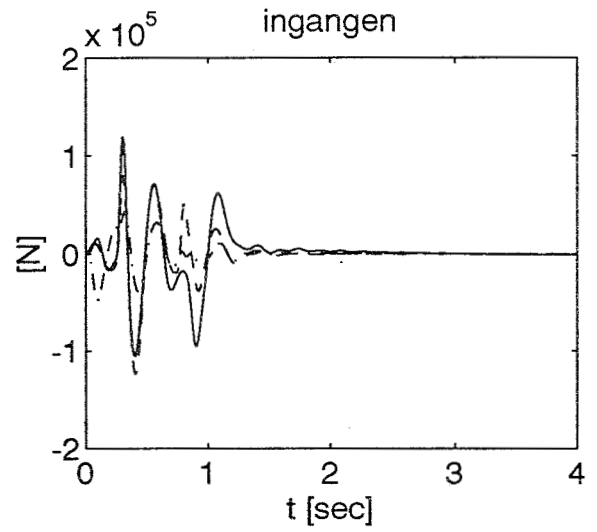
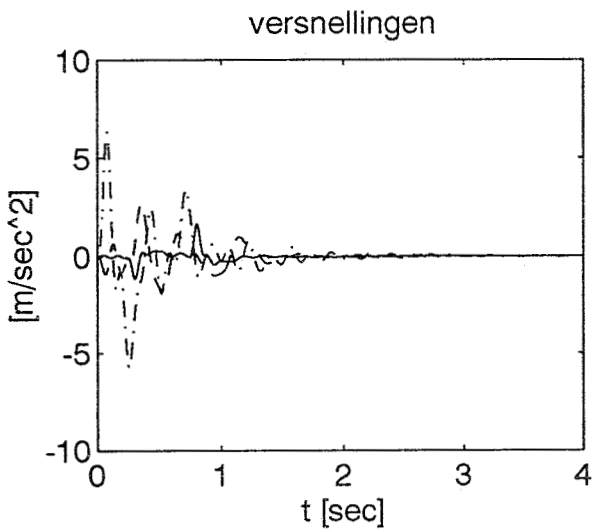
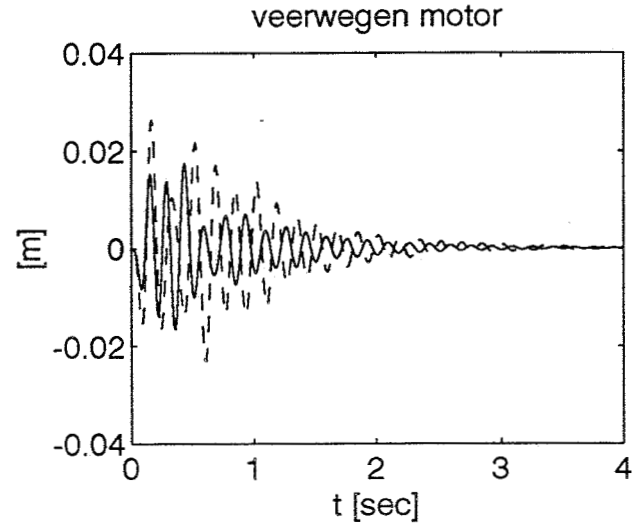
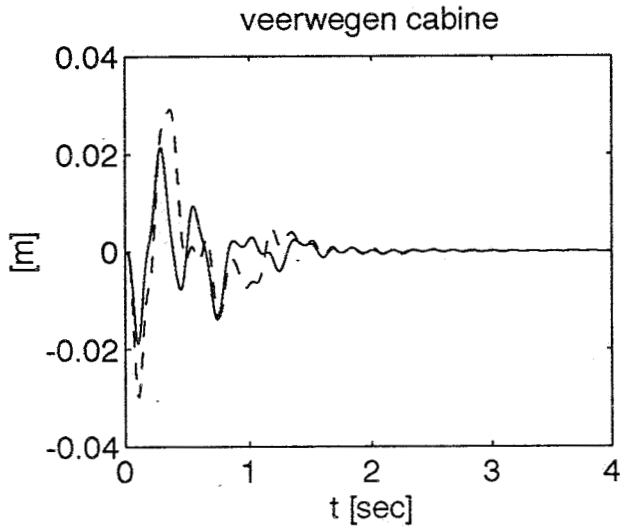
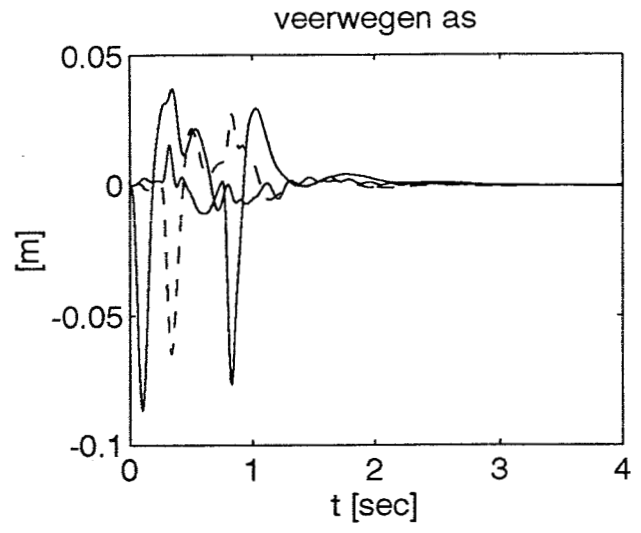
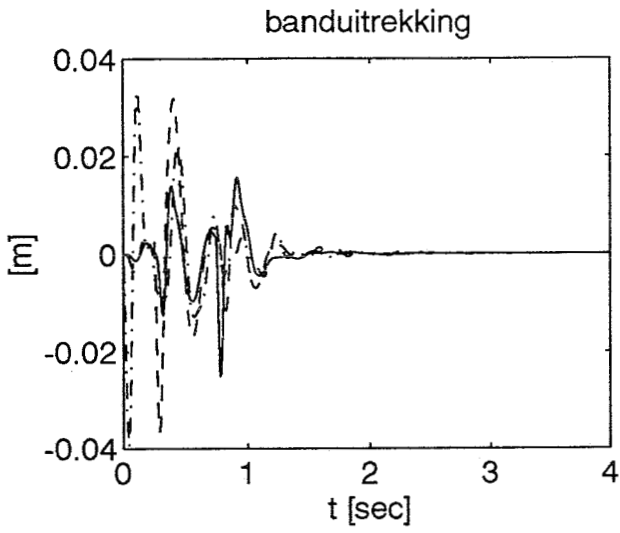
Het geregelde gedrag van IU set $y_8 y_{13}/u_1 u_2$



Het passieve systeem met -25% fout in de dempingscoëfficiënten



Het geregelde gedrag van IU set $y_6 y_7 y_8 / u_1 u_2 u_3$



Het geregelde gedrag van IU set $y_1 y_8 y_{13}/u_1 u_3 u_4$

