

Afscheidscollege

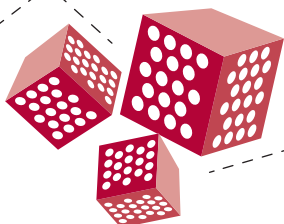
27 MEI 2011



“HOE DE
DINGEN
WERKEN”

SPREKER

PROF.DR.IR. J.B. JONKER



UNIVERSITEIT TWENTE.



PROF.DR.IR. J.B. JONKER

"HOE DE DINGEN WERKEN"

Afscheidscollege

Prof.dr.ir. J.B. Jonker
Hoogleraar Werktuigbouwkundige Automatisering
Universiteit Twente

Vrijdag 27 mei 2011

ZEER GEWAARDEERDE TOEHOORDERS,

Met dit college neem ik afscheid als hoogleraar Werktuigbouwkundige Automatisering aan de Universiteit Twente. Een afscheidscollege geeft een hoogleraar de kans zich te richten tot een wat breder publiek dan de betrekkelijk beperkte groep studenten, die gewoonlijk naar hem luistert. Het geeft mij de gelegenheid voor een terugblik op mijn speurtocht naar HOE DE DINGEN WERKEN. Ik illustreer deze speurtocht aan de hand van het oplossen van problemen bij een vijftal verschillende werktuigen en machines. Daarnaast zal ik enkele ontmoetingen en ervaringen aanstippen, die mijn leven als hoogleraar richting hebben gegeven.

1. HET BEGIN

Ik zal beginnen bij het begin. Ik ben geboren in een oude Saksische boerderij in het prachtige landschapspark ten oosten van Winterswijk. Om precies te zijn in het buurtschap Kotten. Mijn eerste levensjaren heb ik daar in en rond deze boerderij doorgebracht. Ik maakte dus als kind kennis met het boerenleven van volwassen mensen net na de tweede wereldoorlog. Het beeld dat ik daarvan heb overgehouden is dat er veel zwaar lichamelijk werk werd verricht. Vrijwel alle werkzaamheden werden nog met de hand gedaan. Wel zag ik de eerste ontwikkelingen op het gebied van landbouwmechanisatie.

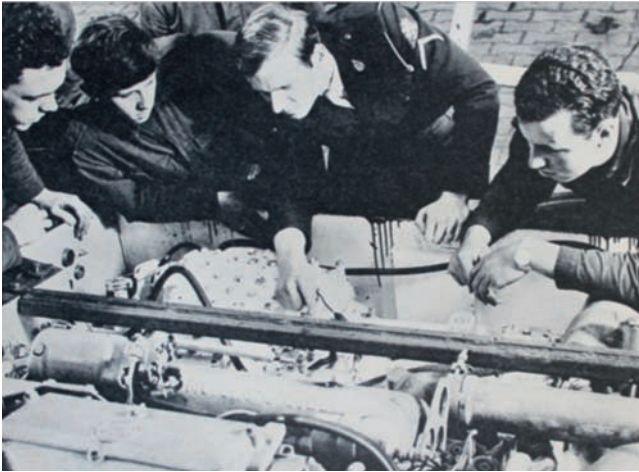
Op het erf was ook een timmerwerkplaats van mijn oom. Mijn eerste herinnering hieraan is het lawaai van de houtbewerkingsmachines. Mijn oom was een vooruitstrevend zakenman en ik kan me nog goed herinneren hoe op zekere dag een nieuwe machine afkomstig uit Zweden van een boerenwagen werd geladen. Buren (noabers) werden uitgenodigd om hierbij te helpen, want geschikte hijswerktuigen waren nog niet voor handen.

Ik denk dat mijn fascinatie voor werktuigen en machines door deze ervaringen al in mijn eerste levensjaren is ontstaan. Immers, ik zag hoe landbouwwerktuigen geleidelijk aan het zware lichamelijke werk overnamen. Ook zag ik hoe met machines producten zoals ramen, deuren en kozijnen werden gemaakt.

Ik behoor tot de groep die nu 'de babyboomgeneratie' genoemd wordt, de generatie die vlak na de tweede wereldoorlog werd geboren. Gezinnen, vooral in christelijke en katholieke kringen, waren omvangrijk. Meer dan tien kinderen was geen uitzondering. We zaten in grote schoolklassen met vaak meer dan 40 leerlingen. Traditionele rolpatronen en een autoritaire omgeving leidden ertoe dat jongeren weinig hadden in te brengen, want ouderen zetten de trends. Van mijn lagere schoolklas (figuur 1) zouden slechts twee jongens doorleren en via een omweg de universiteit bereiken.



Figuur 1: Lagere school klas 3 (1955)



Figuur 2: Uit de Televisier van maart 1968

Wij moesten ook onze militaire dienstplicht vervullen. U ziet in figuur 2 dat ik mij toen al bezig hield met het overdragen van kennis op anderen. Als technisch instructeur rupsvoertuigen verzorgde ik cursussen voor monteurs in opleiding. De foto werd (ongevraagd) gebruikt in advertenties van de Koninklijke Landmacht voor de werving van beroepspersoneel.

2. KRAANBOUW (1968-1971)

Mijn eerste baan was bij de Nederlandse Kraanbouw Maatschappij te Utrecht. Een bedrijf gespecialiseerd in het ontwerpen en bouwen van havenkranen en transportinstallaties. Ik kwam daar als constructeur op de ontwerpafdeling. Hier ontdekte ik hoe je deze werktuigen met eenvoudige rekenmodellen kon ontwerpen. Het rekenwerk werd uitgevoerd met de rekenliniaal. Vormgeving was een spel van creativiteit binnen de spelregels opgelegd door de wetten van de statica en de toegepaste mechanica. Kranen ter grootte van kerktorens ontstonden er zo op mijn tekenbord. En al die dingen werden ook ge-

bouwd waarbij constructiefouten onmiddellijk werden teruggekoppeld naar de ontwerper. Een harde maar wel een goede leerschool om het ontwerpvak te leren. Enkele kranen die ik destijds heb ontworpen zijn na ruim 40 jaar nog steeds in bedrijf. Op deze foto (figuur 3) zijn enkele dubbelarm kranen te zien in de haven van Willemstad in Curaçao. Van deze kranen heb ik destijds het voorontwerp gemaakt. De verhoudingen van de armen zijn zodanig gekozen dat de last een vrijwel horizontale beweging maakt. Het belang van de zogenaamde horizontale lastlijn is het volgende: bij toppen is het wenselijk om de krachten in het mechanisme dat deze beweging aandrijft, het topwerk, beperkt te houden. In geval van een helling in de lastlijn, moet het topwerk een hijsbeweging uitvoeren en is meer topvermogen nodig. Zoals ik daarnet al zei, gebruikte ik eenvoudige rekenmodellen bij het



Figuur 3: Dubbelarm kranen in de haven van Willemstad (Curaçao)

ontwerpen. Bijvoorbeeld voor het portaal van deze kranen dat is samengesteld uit kokerconstructies. Het werd gemodelleerd als eenvoudig frame waarbij balkentheorie werd gebruikt voor het berekenen van de sterkte en stijfheid. Dat balkentheorie niet toereikend was voor deze be-

rekeningen beseftte ik terdege, maar helaas kon ik de boeken met meer geavanceerde modellen uit de elasticiteitstheorie niet lezen, want de wiskundige symbolen die gebruikt werden, gingen ver boven mijn pet. Dit is voor mij een belangrijke reden geweest om werktuigbouwkunde te gaan studeren aan de Technische Hogeschool in Eindhoven. De ontwikkeling van een kokerbuigelement voor de berekening van de spanningsverdeling in op buiging belaste dunwandige kokerprofielen zou vier jaar later het onderwerp worden van mijn afstudeerscriptie. Tegenwoordig zijn er eindige elementen pakketten op de markt waarin deze constructiedelen als zogenaamde superelementen beschikbaar zijn.

TECHNISCHE HOGESCHOOL EINDHOVEN (1971-1976)

De Technische Hogeschool in Eindhoven had in die tijd een avondcurriculum voor HBO studenten. Omdat ik vertrouwd was met avondstudie lag de keuze voor Eindhoven dus voor de hand. Ik meldde mij dan ook meteen aan als werkzoekende bij de afdeling personeelszaken van de TH. Na enkele weken kreeg ik een telefoontje van een zekere professor N.G de Bruijn. Hij zocht een computerprogrammeur voor het door ZWO gefinancierde project AUTOMATH. Toen ik hem vertelde dat ik nog nooit een computerprogramma had geschreven antwoordde hij dat dit eenvoudig was te leren. Na een sollicitatiegesprek bij hem thuis werd ik aangenomen. AUTOMATH is een wiskundige taal ontworpen door de Bruijn om wiskundige bewijzen te verifiëren met behulp van de computer. Hij had daarvoor een processor geschreven in de computertaal ALGOL 60 die moest worden uitgebreid en voorzien van een gebruikersvriendelijke interface.

Tijdens de universitaire zomervakanties kwam de Bruijn nogal eens met een verzoek om de oplossingen van een ingewikkeld combinatorisch probleem te verifiëren met behulp van numerieke simulatie. Het schrijven van zulke programma's vergde het uiterste van

mijn abstractievermogen. Een belangrijke ervaring die ik hier opdeed was het vertrouwd raken met het schrijven van complexe computer software. Een ervaring waar ik later veel profijt van zou hebben.

Van mijn studie herinner ik me vooral de mechanicacolleges van professor Alblas. Zijn mathematisch analytische aanpak van realistisch lijkende problemen uit de Technische Mechanica sprak me aan. Een nadeel was overigens wel dat het moeilijk was om deze theorieën toe te passen op problemen uit de praktijk. Voor deze problemen waren de randvoorwaarden vaak weer net even anders en stond de oplossing niet in het handboek. Dit heeft de ontwikkeling van breder toepasbare numerieke methoden zoals bijvoorbeeld de eindige elementen methode sterk bevorderd.

3. ULTRA CENTRIFUGE NEDERLAND (1976-1980)

Mijn eerste baan als afgestudeerd ingenieur was op het laboratorium van Ultra Centrifuge Nederland in Amsterdam, het latere Euroenco en nu Enrichment Technology. Daar werd onderzoek gedaan aan uraniumscheiding met ultra snel draaiende centrifuges met het doel om dit proces op industriële schaal te demonstren. Hiertoe werd een proeffabriek gebouwd in Almelo waarin grote aantallen centrifuges in cascades werden opgesteld, zie figuur 4.

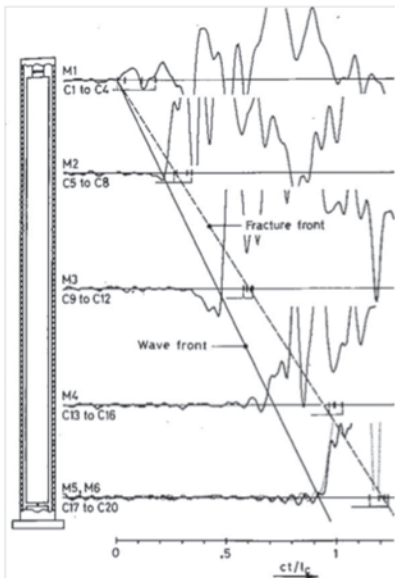
Een ultracentrifuge bestaat uit een lange cilindrische behuizing waarin een dunwandige rotor met zeer hoge snelheid draait. De behuizing is vertikaal bevestigd op een zware betonnen vloer. Om het elektrisch aandrijfvermogen van de centrifuges binnen bepaalde grenzen te houden, worden de centrifuges in vacuüm bedreven. Dit brengt bijzondere problemen met zich mee. Wanneer de rotor van zo'n centrifuge bezwijkt (crasht) mag er geen lek ontstaan in de behuizing. Ik werd aangesteld om te trachten dit probleem op te lossen.



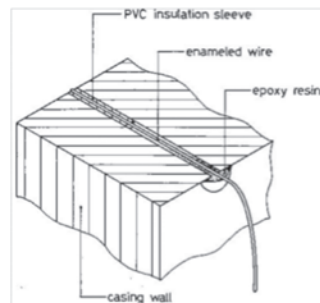
Figuur 4: Cascade van ultracentrifuges in een verrijkingsfabriek

Om inzicht te krijgen in het dynamisch gedrag van de centrifugebehuizing tijdens een crash hebben we experimenten uitgevoerd waarbij een crash werd geïnitieerd door de draaifrequentie van de rotor te verhogen tot breuk optrad. Op de behuizing werden rekstrookjes geplakt om de torsiemoment-responsies te meten. Om het breukgedrag van de rotor te onderzoeken hebben we zogenaamde impact detectoren gemonteerd in de wand van de behuizing. Zo'n detector bestond uit een geïsoleerd draadje dat met speciale lijm in de wand van de behuizing werd gemonteerd, zodat het uiteinde een klein stukje uit de binnenwand stak, zie figuur 6. Bij aankomst van de eerste rotorscherven maakte dit uiteinde elektrisch contact met de binnenwand waarmee een trigger-sigitaal naar een elektronische klok werd gestuurd die prompt werd gestart. Het systeem registreerde vervolgens de eerste aankomsttijden van de scherven op verschillende hoogteniveaus in de centrifugebehuizing. Figuur 5 toont het elastische torsiegolffront dat zich vanuit de initiële breukpositie naar beneden voortplant met golfsnelheid c . Ook de eerste aankomsttijden van de scherven zijn weergegeven. Het blijkt dat het breukfront zich met een iets lagere snelheid verplaatst dan het torsiegolffront zoals kan worden geconstateerd uit de eerste aankomsttijden op de verschillende niveaus. Dit inzicht in het breukgedrag

van de rotor, maakte het mogelijk om een dynamisch crashmodel te ontwikkelen waarbij de rotor uiteenvalt in gelijke delen (secties) in een volgorde bepaald door het breukgedrag, zie figuur 7. Elk segment veroorzaakt een tangentiële schokbelasting op de binnenwand van de behuizing. De torsiemoment-responsie ten gevolge van een crash van de gehele rotor wordt berekend door een superpositie van alle segmentresponsies. Figuur 8 toont een vergelijking van het voorspelde dimensieloze torsiemoment in de behuizing ter plaatse van de fundatie met diametraal ten opzichte van elkaar gemeten torsiemomenten $M5/I_0c$ en $M6/I_0c$, zie figuur 5. Hierin is I_0 het impulsmoment van de rotor. De voorspelde momenten komen goed overeen met de gemeten waarden. Dooreen combinatie van experimenteel en theoretisch onderzoek lukte het om dit complexe dynamische probleem op te lossen. Het onderzoek leidde tot een optimalisatie van de behuizing van deze centrifuges en een meer gerichte ontwikkeling van behuizingen voor toekomstige centrifuges.



Figuur 5: Torsiegolffronten en breukfronten

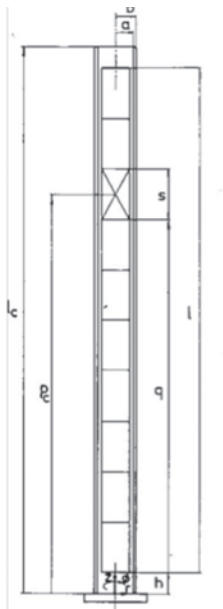


Figuur 6: Impact detector

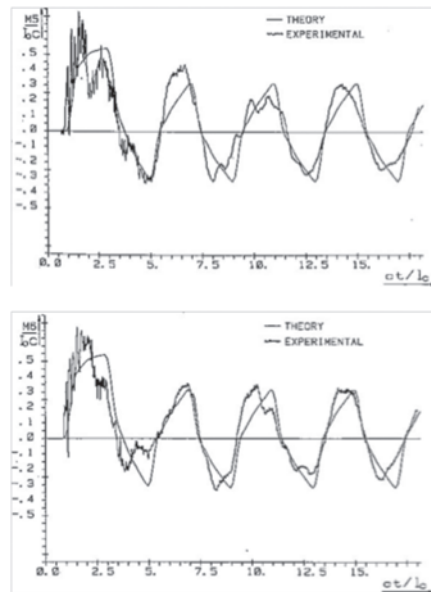
Dit onderzoek illustreert ook de technisch wetenschappelijke onderzoeksmethode. Daarbij kun je een viertal stappen onderscheiden:

1. Modelvorming aan de hand van een fysische beschouwing of een inzicht verkregen uit experimenten, het fysisch model;
2. Vertaling van fysisch model naar een wiskundige beschrijving van het probleem of systeem;
3. Het oplossen van het wiskundige probleem;
4. De gevonden oplossing verifiëren aan de hand van experimentele gegevens.

In afstudeeropdrachten komt dit vierluik vrijwel altijd aan de orde. De beheersing van dit gehele proces is wat een student een goed ingenieur maakt.



Figuur 7: Crash model



Figuur 8: Gemeten en gesimuleerde torsieresponsies aan de voet van de behuizing.

In datzelfde laboratorium werkte Bert Brouwers die toen aan het promoveren was bij professor van Wijngaarden. Bert deed onderzoek aan roterende stromingen in gascentrifuges en gebruikte daarbij perturbatiemethoden. Hij heeft mij geïnspireerd om deze technieken ook toe te passen voor de ontwikkeling van het dynamisch crashmodel. De resultaten van het crashonderzoek zijn gepubliceerd in het tijdschrift "Nuclear Engineering and Design" [1]. Overigens was het vanwege de strenge geheimhoudingsregels moeilijk om wetenschappelijk werk te publiceren. Ik zou groepsleider worden van de dynamicagroep, maar het bloed kruipt waar het niet gaan kan; toen ik de kans kreeg om wetenschappelijk medewerker te worden in Delft in de groep van professor Hans Besseling was dat voor mij het moment om te kiezen voor een wetenschappelijke carrière.

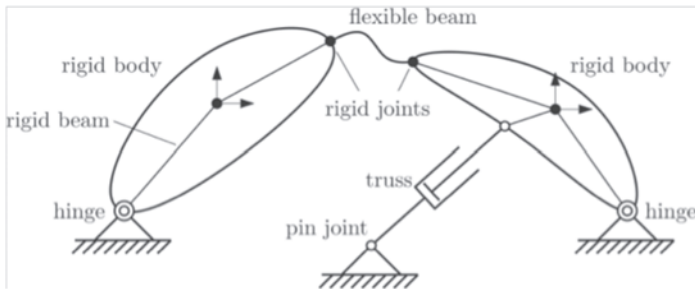
4. TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT, TECHNISCHE MECHANICA (1980-1988)

De overgang naar Delft heeft grote gevolgen gehad voor mijn verdere carrière. De vakgroep Technische Mechanica in Delft had een sterke wetenschappelijke traditie en reputatie met mensen als Koiter en zeker ook Bottema die weliswaar niet tot deze vakgroep behoorde maar wel prominent aanwezig was bij colloquia zoals het DET-colloquium, waar wetenschappers van de universiteiten van Delft, Eindhoven en Twente jaarlijks hun nieuwste onderzoeksresultaten op het gebied van mechanismen presenteerden. De sfeer in de vakgroep was in die tijd nog tamelijk formeel. Ik werd met u aangesproken en de democratisering was slechts in formele zin ingevoerd. Af en toe werd er gestemd in een vakgroepvergadering over een controversieel punt waarover de hoogleraren het onderling niet eens konden worden, maar verder was van democratische verhoudingen weinig te merken in de dagelijkse gang van zaken. Dat vond ik overigens helemaal niet erg. In deze vakgroep was het toen regel dat je als me-

dewerker geen college mocht geven. Je mocht alleen studenten begeleiden, zowel in de voorkandidaatsfase als in de hoofdvakstudie. Dit betekende dat er veel tijd was om aan nieuwe wetenschappelijke problemen te werken. Door zijn manier van werken gaf Besseling je het gevoel en het vertrouwen dat je zelf ook iets nieuws kon bedenken. Dat was een omgeving waarin ik me zeer op mijn plaats voelde.

Besseling [2,3], stond aan de wieg van een unieke eindige elementen theorie die kan worden beschouwd als het discrete analogon van het klassieke veldconcept uit de continuüsmechanica. In deze benadering wordt voor elk element een eindig aantal discrete vervormingen gedefinieerd die invariant zijn voor willekeurige starre lichaamsverplaatsingen van het element. De definitie van de vervormingsfuncties omvat de beschrijving van deze starre lichaamsverplaatsingen, als verplaatsingen waarvoor de discrete vervormingen nul zijn. Het was Klaas van der Werff [4], die als eerste liet zien hoe deze eindige elementen aanpak kon worden gebruikt voor de kinematische analyse van mechanismen. Tijdens een vakgroep colloquium, in 1982, presenteerde hij een eerste versie van het computerprogramma SPACAR [10], voor de kinematische analyse van ruimtelijke mechanismen. In die tijd implementeerde Arend Schwab [5] in het kader van zijn afstudeeropdracht, al een lumped-mass aanpak voor de dynamische analyse van ruimtelijke mechanismen. Ik zag de kracht van de gebruikte eindige elementen formulering die het mogelijk maakte om elastische mechanismen en multibody systemen te modelleren. In deze benaderingswijze wordt een multibody systeem beschouwd als een verzameling van starre of vervormbare elementen die met elkaar zijn verbonden door scharnier-elementen of elastische verbindingselementen, zie figuur 9. Geometrische niet-lineariteiten ten gevolge van deformaties kunnen op element niveau worden ingevoerd. Dit resulteert in een nauwkeurige en rekentechnisch efficiënte formulering die aantrekkelijk is voor ontwerpdoeleinden.

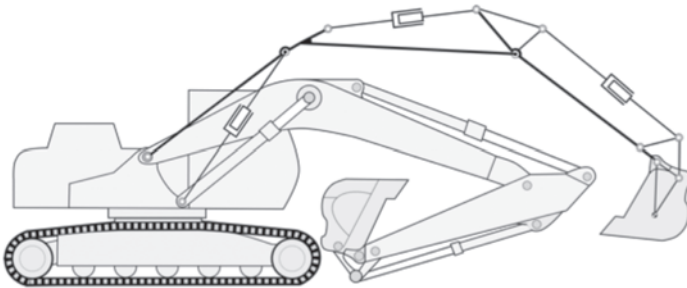
De verdere ontwikkeling van een dynamische formulering voor



Figuur 9: Eindige elementen representatie van een elastisch multibody systeem

elastische elementen in SPACAR zou tot mijn promotie leiden [7,8,9], in 1988, bij Hans Besseling en Okko Bosgra. Jaap Meijaard [11,12] heeft daarna enkele vereenvoudigingen en uitbreidingen aangebracht in deze formulering. Als ik op een multibody symposium of conferentie kom, word ik nog wel eens door anderen aangesproken over het NATO-symposium in IOWA-city in America in 1983,[6]. Dat is inmiddels 28 jaar geleden. Daar presenteerden we de eerste versie van SPACAR waarmee dynamische simulaties van ruimtelijke elastische mechanismen kunnen worden uitgevoerd. Wij waren de eersten die dergelijke simulaties konden maken, een doorbraak waarvan we ons – achteraf gezien– onvoldoende bewust waren.

Okko Bosgra heeft mij geïnspireerd om de verbinding met het vakgebied mechatronica te maken. Daarvoor was het nodig om een gelineariseerde input-output formulering te ontwikkelen. Na een jaar hard werken, lukte het om de gelineariseerde state-space vergelijkingen te genereren met een beperkte input-output structuur. Hiermee kon het dynamisch gedrag van elastische manipulators en robots in samenhang met een regelsysteem worden bestudeerd [13]. Een typisch voorbeeld is de graafmachine in figuur 10, waarvan de armen en de hydraulische cilinders zijn gemodelleerd door beweegbare balkelementen en actieve slider-truss elementen. Verderop in het verhaal zal ik u enkele recente simulatieresultaten van het pakket SPACAR laten zien.



Figuur 10: Eindige elementen representatie van een hydraulische graafmachine in SPACAR

Figuur 11 toont een foto van de onderzoekers die waren betrokken bij de ontwikkeling van het pakket SPACAR. De foto is gemaakt na afloop van de afscheidsrede van Klaas van der Werff in 2006.



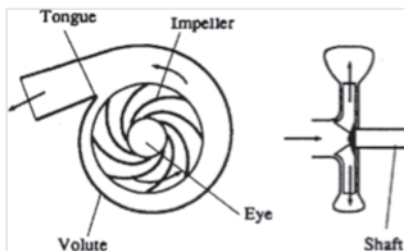
Figuur 11: Ontwikkelaars van SPACAR, van links naar rechts: Arend Schwab, Ben Jonker, Klaas van der Werff en Hans Besseling, geheel rechts: Jaap Meijaard in zijn werkkamer op de UT.

In het jaar waarin ik promoveerde werd ik door Bert Brouwers, die inmiddels tot hoogleraar was benoemd aan de Universiteit Twente, gevraagd om naar Twente te komen om onderzoek te gaan doen aan roterende stromingsmachines, in het bijzonder de ontwikkeling van numerieke stromingsmodellen, voor centrifugaalpompen. Het aanbod van Bert leek me een interessante uitdaging, maar het was wel een geheel nieuw onderzoeksterrein. Dit leidde tot mijn vertrek naar Twente.

5. UNIVERSITEIT TWENTE, THERMISCHE WERKTUIGBOUWKUNDE (1988-1996)

Toen ik in Twente aankwam, merkte ik meteen dat de Universiteit Twente, meer dan Delft gericht was op samenwerking met de industrie en dat sprak me aan. Dit betekende dat van meet af aan werd gewerkt aan een intensieve relatie met Stork Pompen (tegenwoordig Flowserve). Stork stond daar weliswaar niet onwelwillend tegenover, maar toch overheerste bij hen het gevoel: "what's in it for us". Zo'n universiteit doet alleen maar theoretisch onderzoek, was de overweging bij hen destijds. De gesprekken met hydraulisch ontwerper Johan op de Woerd bleken cruciaal. We begonnen in te zien wat we voor elkaar konden betekenen en er ontstond een vertrouwensrelatie. Dat was de kiem voor de later zo succesvolle samenwerking.

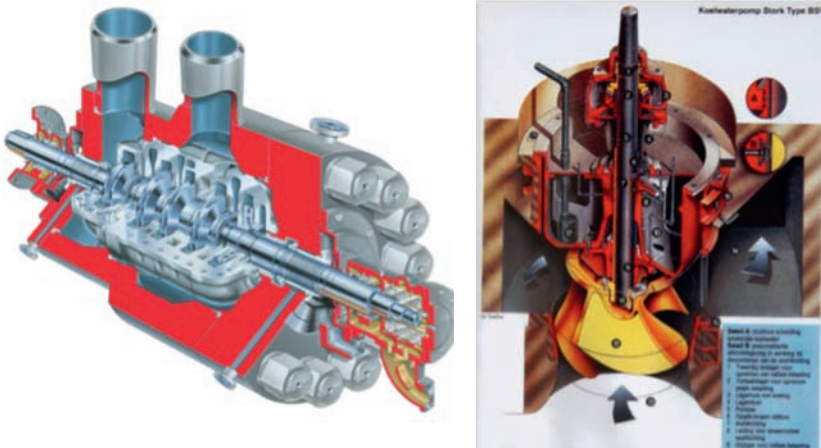
Terug naar het onderzoek. Centrifugaal pompen worden voor vele doeleinden gebruikt. Voorbeelden zijn pompen voor CV-ketels, gemalen, drinkwatervoorziening, energiecentrales en procesindustrie. In een centrifugaalpomp wordt energie aan een daarin stromende vloeistof overgedragen door een roterend schoepenwiel (waaier) in een slakkenhuis, zie figuur 12. De vloeistof wordt axiaal in het oog van de waaier aangezogen, waarna de stromingsrichting van axiaal naar radiaal wordt omgebogen. Terwijl de vloeistof bij haar gang door de schoepkanalen naar een grotere radius geleid wordt nemen



Figuur 12: Centrifugaalpomp

zowel de statische druk als de dynamische druk toe. Dit leidt tot een toename van de totale druk die wordt uitgedrukt in de opvoerhoogte. Het slakkenhuis verzamelt de vloeistofstroom uit de waaier en zet een deel van de kinetische energie om in statische druk. In het proces van energieoverdracht speelt de stroming een essentiële rol en die wordt bepaald door de vorm en afmetingen van de pomp

Er bestaan vele uitvoeringsvormen van centrifugaalpompen afhankelijk van de verhouding tussen opvoerhoogte, debiet en het toerental van de waaier. In figuur 13 zijn twee verschillende typen van centrifugaalpompen afgebeeld, namelijk een ketelvoedingspomp (links) en een koelwaterpomp (rechts). Deze pompen worden gebruikt in energiecentrales. De stromingsprocessen in deze pompen gaan gepaard met een hoge

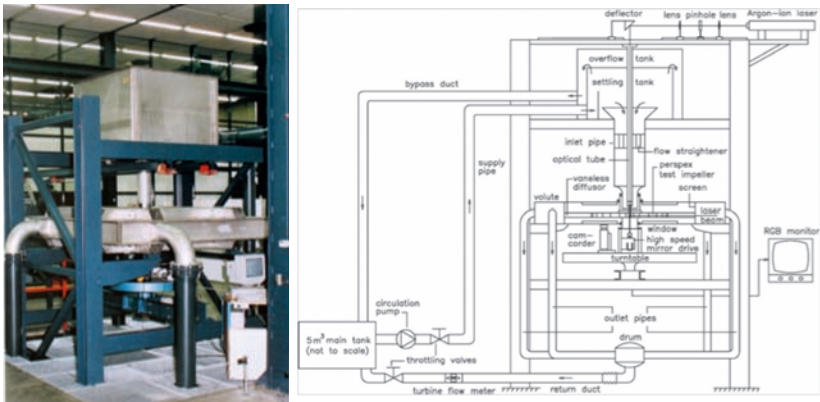


Figuur 13: Ketelvoedingspomp (links), koelwaterpomp (rechts)

energiedichtheid, tot 40 MegaWatt (MW) voor de ketelvoedingspomp. Centrifugaalpompen werden in de 80-er jaren nog voornamelijk met de gangbare 'trial and error' methode ontworpen door modificatie van een bestaand ontwerp. Dat was tijdrovend en duur en leidde niet altijd tot een optimale oplossing. Als u bedenkt dat voor een koelwaterpomp met

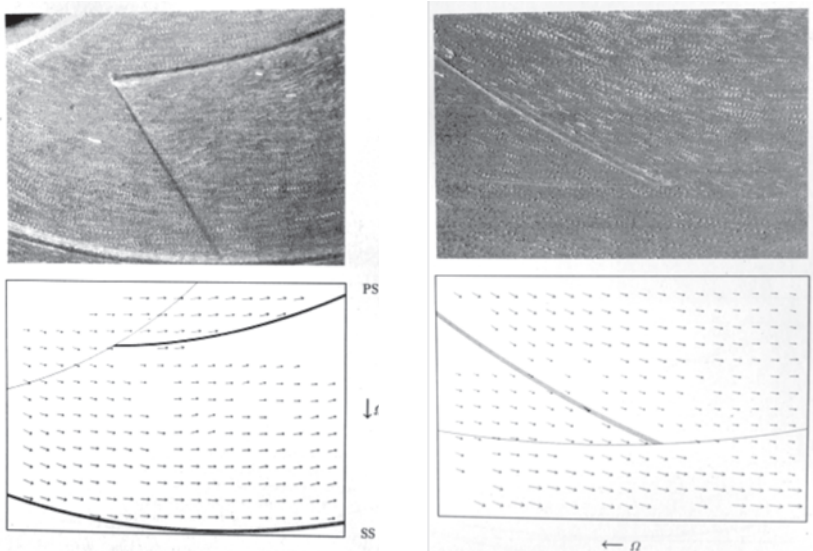
een debiet van 12,5 m³/sec, een verhoging van het rendement met twee procentpunten, over de totale levensduur van de pomp, 1.5 miljoen dollar aan energiekosten bespaart, dan is het belang van de pompenbouwers bij de ontwikkeling van betrouwbare stromingsmodellen duidelijk.

Bij het ontwerpen van vliegtuigen werden numerieke stromingsanalyses al jaren lang met succes gebruikt. Om dit ook voor pompen mogelijk te maken richtten we het onderzoek op het ontwikkelen van numerieke stromingsmodellen en simulatiesystemen voor centrifugaalpompen. We wisten dat zulke systemen alleen zouden worden geaccepteerd in een industriële ontwerpomgeving als de geometrie van waaier en slakkenhuis op eenvoudige wijze kunnen worden ingevoerd, de berekende stromingsvelden betrouwbaar zijn, snel kunnen worden berekend en op een inzichtelijke manier worden gepresenteerd. Experimentele verificatie van de resultaten was vanzelfsprekend een belangrijk onderdeel van het onderzoek. Met financiële ondersteuning van Shell bouwden we een roterende meetopstelling waarmee de vloeistofsnelheden in de roterende waaierkanalen konden worden gemeten, doordat de meetapparatuur met de waaier meedraaide, zie figuur 14 (links). De meetsectie bestond uit een transparante waaier (van perspex) die op een draaitafel werd gemonteerd tussen twee horizontale glazen vensters. Voor de snelheidsmeting maakten we gebruik van Laser-Doppler Velocimetrie (LDV) en met behulp van particle-image visualisatie (PIV), visualiseerden we de stroming. Om dat laatste mogelijk te maken werden kleine polystyreen bolletjes toegevoegd aan de vloeistof (in dit geval water). Een laserstraal werd geprojecteerd op een snel roterend spiegeltje waardoor een lichtvlak in de waaierkanalen werd gevormd waarin de meebewegende bolletjes zichtbaar werden, zie figuur 14 (rechts). De beweging van de bolletjes ten opzichte van de roterende waaierschoepen werd vervolgens met een video camera vastgelegd.



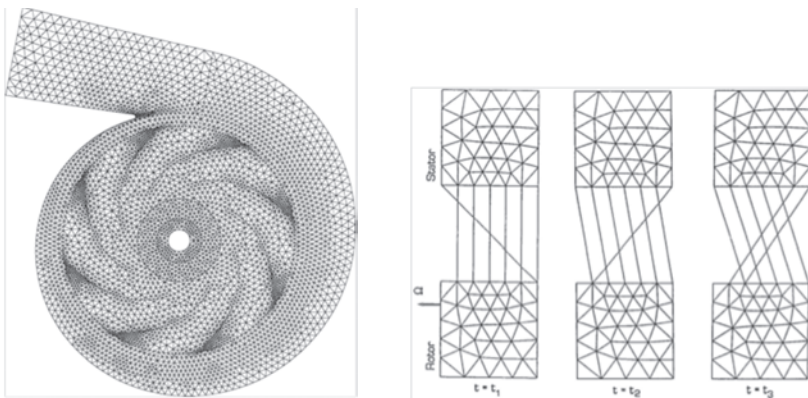
Figuur 14: Roterende meetopstelling (links), PIV-opstelling (rechts)

Figuur 15 toont visualisaties van de stroming aan de intree- en uittreezijde van de roterende waaierschoepen, die optreedt rond het ontwerpbedrijfspunt. Frank Visser [14,15], ontwikkelde een analytisch



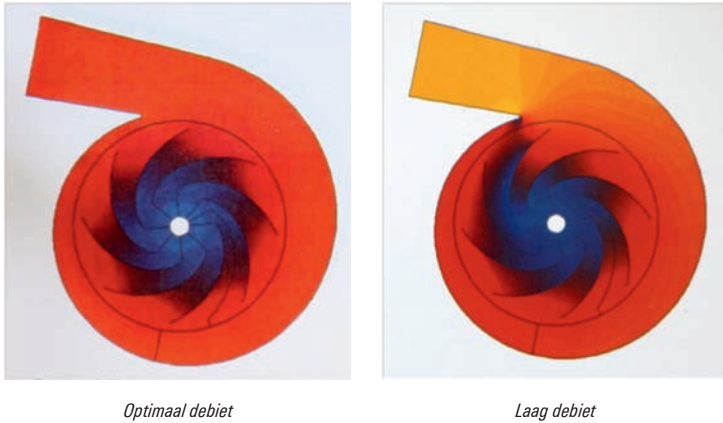
Figuur 15: Visualisatie van de stroming aan de intree- en uittreezijde van de roterende waaierschoepen.

model waarmee de stroming in een vlakke tweedimensionale pomp-waaier kan worden berekend. Hij toonde aan dat rond het ontwerpbedrijfspunt de niet-viskeuze hoofdstroming in de kanalen goed kan worden beschreven met behulp van potentiaaltheorie. Voor de analyse van de pompwerking is een beschrijving van de interactie tussen waaier en slakkenhuis belangrijk. De beweging van de waaier ten opzichte van het slakkenhuis resulteert in een instationaire stroming, vooral buiten het optimale werkpunt van de pomp. Dit wordt ook wel Best Efficiency Point (BEP) genoemd. Ramin Badie [16, 17,18], ontwikkelde samen met enkele afstudeerderstudenten waaronder Tom van Essen en Frits de Lange een numeriek algoritme dat met behulp van het eindige elementen pakket SEPRAN de instationaire potentiaalstroming in een centrifugaalpomp bestaande uit een waaier en een slakkenhuis berekent. Het probleem van de roterende waaier wordt op een speciale wijze aangepakt, waarbij het rekendomein wordt gesplitst in twee gebieden. Een gebied bevat de roterende waaier en het andere het stilstaande slakkenhuis. Elk gebied wordt vervolgens in een afzonderlijk coördinatensysteem beschouwd zodanig dat de knooppunten van de eindige elementen mesh in de tijd niet van coördinaat veranderen. Op de grens tussen de twee gebieden



Figuur 16: Verbinding van knooppunten op de sliding interface

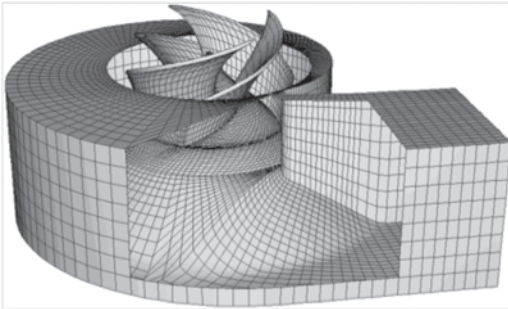
wordt een zogenaamde sliding interface aangebracht waar de knooppunten in beide vlakken op elk tijdstip op de juiste manier met elkaar worden verbonden zoals geïllustreerd in figuur 16. Via de instationaire Bernoulli-vergelijking wordt het drukveld berekend, zie figuur 17.



Figuur 17: Instationair drukveld in centrifugaal pomp

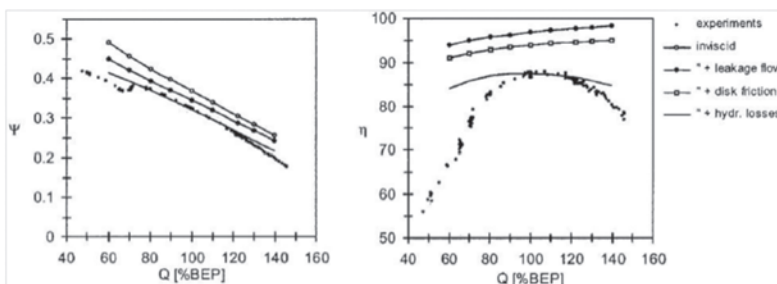
Een probleem bij de modelvorming van pompen is de zeer complexe driedimensionale geometrie van de waaierschoepen. Ook het slakkenhuis heeft een ingewikkelde vorm. Een voorbeeld van een pomp met een complexe waaiergeometrie is de koelwaterpomp afgebeeld in figuur 13 (rechts). Bart van Esch en Niels Kruyt [19,20] hebben het tweedimensionale model uitgebreid en geschikt gemaakt voor het berekenen van de instationaire potentiaalstroming in driedimensionale rotor-stator configuraties. Dit leidde tot wat COMPASS (Centrifugal or Mixed-flow Pump Analysis Software System) is gaan heten [21]. Een geheel nieuw softwaresysteem waarmee het gedrag van pompen met complexe driedimensionale waaievormen, niet al te ver buiten het ontwerpbedrijfspunt, nauwkeurig en snel voorspeld kan worden. Het systeem is gebaseerd op de Eindige Elementen Methode met als bijzondere aspecten substructuring en impliciete Kutta voorwaarden. De geometrie van de waaier en het slakkenhuis wor-

den parametrisch beschreven en de mesh generatie is volledig geautomatiseerd. Een voorbeeld van zo'n mesh is afgebeeld in figuur 18.



Figuur 18: Eindige elementen mesh voor een mixed-flow pomp

Marijn van Os [23], maakte de roterende meetopstelling geschikt voor het meten van 3D-stromingsprofielen in de waaier en het pomphuis. De berekende en gemeten resultaten bleken goed overeen te komen. Van Esch en Kruyt [22], hebben laten zien dat het mogelijk is om op basis van de berekende stroomsnelheden langs de bewegende- en vaste wanden van de waaier en het slakkenhuis een goede afschatting te maken van de optredende verliezen in de grenslagen. In figuur 19 is te zien dat de berekende dimensieloze opvoerhoogte ψ en het rendement η goed overeenkomen met de gemeten waarden, voor debieten variërend van 70% tot 130% van het Best Efficiency Point (BEP).



Figuur 19: Gemeten en berekende dimensieloze opvoerhoogte ψ en het rendement η als functie van het dimensieloze debiet Q

Het op deze manier kunnen voorspellen van de hydraulische prestaties van pompen was destijds een doorbraak in het pomponderzoek. In het bijzonder konden volledige waaier-slakkenhuis configuraties geanalyseerd worden. Dit in tegenstelling tot andere onderzoeksgroepen die alleen de waaier of het pomphuis afzonderlijk beschouwden. Deze modelleertechniek maakte het mogelijk de werking van de pomp op de PC te simuleren en de hoofdstroom te analyseren. Jarenlange ervaring van de ontwerpers van Stork-Pompen (tegenwoordig FLOWSERVE), gekoppeld aan stromingsanalyses die razend snel konden worden uitgevoerd, toonden wat voor invloed een bepaalde verandering in de geometrie van de pomp zou hebben op de prestaties, en stelde pompontwerpers in staat veel betere pompen te ontwikkelen in veel minder tijd.

Behalve het rendement is het voor bouwers van pompen van het grootste belang om cavitatie zoveel mogelijk te voorkomen. Marijn van Os [24], heeft laten zien dat met het ontwikkelde simulatie-gereedschap ook cavitatie-inceptie goed kan worden voorspeld. Aan de hand van een parametrische ontwerpstudie heeft hij laten zien hoe het cavitatie inceptiegedrag kan worden verbeterd door aanpassing van de schoepvorm en het schoepdikte profiel.

Naast de hydraulische prestaties van de pomp is ook de dynamische stabiliteit van de rotor van belang. Dit is in het bijzonder het geval voor hoogbelaste meertrapspompen zoals ketelvoedingspompen in elektriciteitscentrales. Tom van Essen [25,26], heeft een dynamisch model ontwikkeld om met behulp van het ontwikkelde stromingsmodel, vloeistof geïnduceerde krachten op een roterende en whirlende waaier te berekenen. Een reguliere storingsanalyse wordt gebruikt om de whirlbeweging van de waaier te modelleren. De stromingsvariabelen worden opgedeeld in een nulde-orde deel, verbonden met de centrisch roterende waaier, en een eerste-orde deel, verbonden met de whirlbeweging van de waaier. Uit de vergelijkingen die het eerste-orde stroomingsveld beschrijven, worden de bewegingsafhankelijke krachten berekend.

Ronald Aarts [27], heeft in het kader van een Europees onderzoekproject dit dynamisch model voor de berekening van vloeistof geïnduceerde krachten uitgebreid en geschikt gemaakt voor 3D-configuraties.

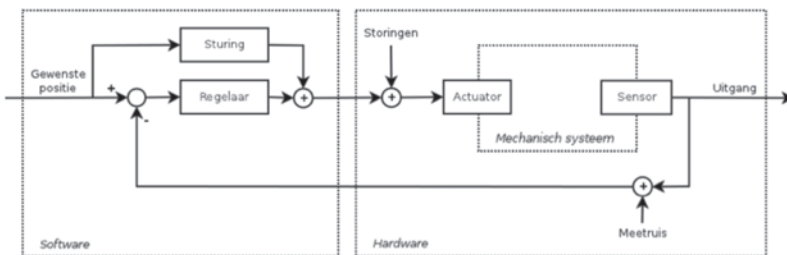
Op het moment dat het pomponderzoek volop resultaten opleverde, kreeg ik in 1996 de vraag om hoogleraar Werktuigbouwkundige Automatisering te worden. Een moeilijke afweging omdat ik graag was doorgegaan met dit onderzoek. Anderzijds bood de nieuwe baan me de mogelijkheid om de modelvormingstechnieken voor multibody systemen uit mijn proefschrift verder te ontwikkelen en toepasbaar te maken voor het ontwerpen van mechatronische systemen. Na veel wikken en wegen heb ik daarom gekozen voor de nieuwe baan.

6. WERKTUIGBOUWKUNDIGE AUTOMATISERING (1996-2011)

Naast de vacante leerstoel “Werktuigbouwkundige Automatisering” waren er nog twee deeltijdleerstoelen in de vakgroep. De leerstoel “Laserbewerking van materialen” met als belangrijkste onderzoeksactiviteit het ontwerpen van systemen voor lasersnijden, -lassen en –oppervlaktebewerkingen en de leerstoel “Mechatronisch Ontwerpen” met als voorname activiteit de ontwikkeling van een Mobile Autonome Robot. Het werkgebied van mijn leerstoel moest worden gericht op het ontwerpen en ontwikkelen van besturingssystemen voor werktuigen en machines. Dit vakgebied wordt ook wel aangeduid met de naam “mechatronica”.

Een mechatronisch systeem wordt gekarakteriseerd door een mechanisch systeem (bijvoorbeeld een machine of werktuig), actuatoren die het systeem laten bewegen, een meetsysteem (sensor) en een elektronisch regelsysteem dat het systeem bestuurt. Het geheel wordt gerealiseerd met behulp van elektronica en software, zie het blokschema van figuur 20. Sensoren meten de beweging, al dan niet met een meetfout (meetruis), waarbij de positie en snelheid worden omgezet in een

elektrisch signaal. Het gemeten signaal wordt vergeleken met de gewenste waarde (setpoint of referentie), en de regelfout wordt middels een regelaar bewerkt tot een stuursignaal naar de actuatoren. De eindige stijfheid van het mechanische systeem beperkt de versnellingen waarmee de regeling kan corrigeren en het is daarom vaak noodzakelijk om naast de corrigerende sturing ook een voorwaartse sturing toe te passen. Hierbij wordt gebruik gemaakt van modelkennis en a priori kennis van de af te leggen baan, om het benodigdeingangssignaal voor de actuatoren te berekenen. Voorwaartse sturing bepaalt vaak in hoge mate de prestaties van het positionersysteem. Voor het goed functioneren van voorwaartse sturing is het belangrijk dat het mechanische systeem reproduceerbaar gedrag vertoont. Alleen dan is het mogelijk om dat gedrag te compenseren om zo een verbeterde prestatie te realiseren. Voorbeelden van mechatronische systemen zijn industriële robots en computergestuurde bewerkingsmachines maar ook producten uit de



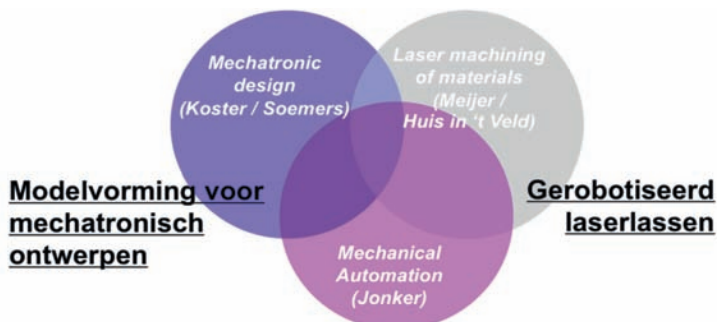
Figuur 20: Blokschema van een mechatronisch systeem

consumentenelektronica zoals DVD-spelers en de digitale fotocamera's. Dat zijn producten waarbij het mechatronisch ontwerp essentieel is.

Modelvorming (machine dynamica) en toepassing van geavanceerde ontwerpmethoden uit de systeem- en regeltechniek zouden de kern gaan vormen van het onderzoek binnen mijn eigen leerstoel. Om de samenwerking met de andere twee leerstoelen te versterken heb ik samen met Johan Meijer, Ronald Aarts en Johannes van Dijk het onder-

zoeksthema, “Gerobotiseerd laserlassen” opgezet. Dit onderzoek werd o.a. gesteund door het Nederlands Instituut voor Metaal Research (NIMR) , het huidige M2i. In een later stadium heb ik daar het thema “modelvorming voor mechatronisch ontwerpen” aan toegevoegd. Het schema in figuur 21 toont de drie leerstoelen en de verbindende onderzoeksthema’s. Ik mocht één nieuwe medewerker aanstellen. Dat werd Ronald Aarts. We werkten al samen bij het pomponderzoek.

7. GEROBOTISEERD LASERLASSEN



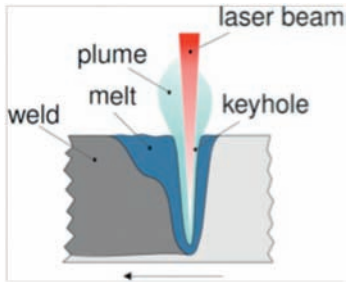
Figuur21: Leerstoelen en onderzoeksthema's vakgroep Werktuigbouwkundige Automatisering

De eerste twee AIO's die voor het nieuwe thema “gerobotiseerd laserlassen” werden aangesteld waren Sjoerd Postma en Erwin Schrijver. Sjoerd richtte zich op de procesbeheersing van het laserlasproces en Erwin op de manipulatie van de laserbundel.

7.1 LASERLASSEN

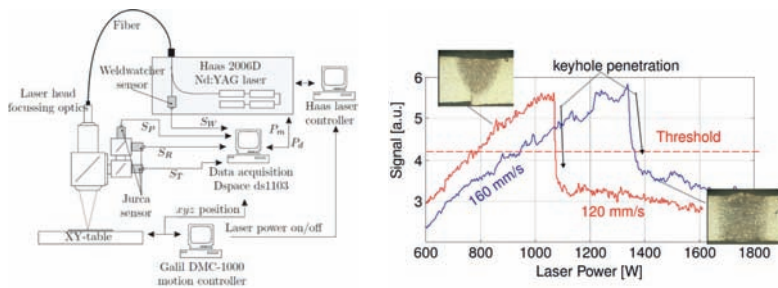
Laserlassen is een verbindingsproces waarbij een gefocuseerde hoogvermogen laserbundel over de naad tussen twee metalen platen wordt bewogen. De diameter van de laserspot is in de orde van grootte van 0.45 mm. De hoge intensiteit ter plaatse van de laserspot doet beide delen (zeer) lokaal smelten.

In het smeltbad vormt zich de zogenaamde keyhole die zorg draagt voor een diepe penetratie van de laserbundel, zie figuur 22. De voordelen van laserlassen ten opzichte van conventionele las-



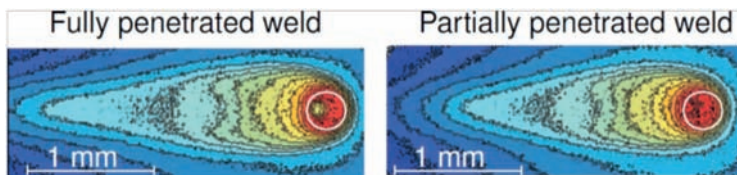
Figuur 22: Het laserlasproces

technieken zijn onder andere de goede kwaliteit, hoge lassnelheid en goede beheersbaarheid van het proces. Aan die beheersbaarheid heeft Sjoerd Postma [28,29], een belangrijke bijdrage geleverd. Hij heeft namelijk een regelsysteem ontwikkeld om de lasdiepte on-line te beheersen. Om dit systeem te ontwikkelen is een experimentele opstelling gebouwd waarvan een schema is afgebeeld in figuur 23. De laserbundel wordt via een optische fiber en een optisch focusseersysteem op de lasnaad gericht. Met behulp van sensoren en camera's worden de emissies uit het smeltbad, figuur 23 en ook de



Figuur 23: Experimentele opstelling voor het laserlasproces (links), scherpe en snelle vermindering in de emissies als de keyhole het materiaal doorboort (rechts)

smeltbad grootte, figuur 24 gemeten en omgezet in elektrische signalen die worden aangeboden aan een elektronisch regelsysteem. Met dit regelsysteem wordt het laservermogen zodanig bepaald dat de lasdiepte over de volledige materiaaldikte wordt gehandhaafd ondanks aangebrachte verstoringen in de lassnelheid en het laservermogen. Omdat de dynamica van de keyhole vele malen sneller is dan die van het smeltbad er omheen kan de grootte van het smeltbad zeer goed worden geregeld door beheersing van de keyhole. In figuur 24 ziet u het smeltbad met de keyhole, opgenomen met een CMOS-camera bij een lassnelheid van 120 mm/sec. Enkele jaren later heeft Benno Aalderink [30,31], een procesregeling ontwikkeld voor het lassen van aluminium platen.

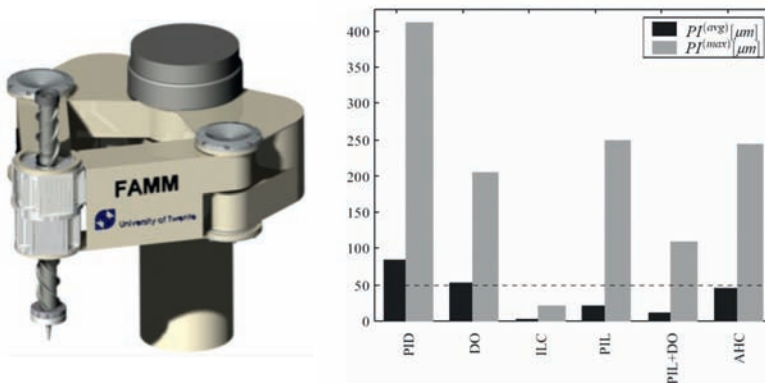


Figuur 24: CMOS camera opname van het smeltbad bij een lassnelheid van 120 mm/sec

7.2 MANIPULATIE VAN DE LASERBUNDEL

Met de komst van snelle microprocessors in de jaren 90 was het aantrekkelijk geworden om industriële robots commercieel in te zetten bij het laserlassen van naden in drie-dimensionale producten. Laserlassen vereist een hoge positioneer-nauwkeurigheid van de laserbundel ten opzichte van de lasnaad. Industriële robotsystemen zijn in het algemeen ongeschikt voor deze toepassing, vanwege hun beperkte volgnauwkeurigheid tengevolge van de lage bandbreedte van standaard industriële regelaars. Om te voldoen aan de vereiste lassnelheid en nauwkeurigheid waren nieuwe besturingsstrategieën nodig. Erwin Schrijver [32,33], startte het onderzoek naar

methoden om de baan-volnauwkeurigheid van robots te verhogen. Daarvoor heeft hij een nieuw besturingsysteem ontwikkeld met een architectuur die vrij programmeerbaar is. Het systeem is geïmplementeerd op de FAMM (Fast and Accurate Manipulator Module), een door Philips ontwikkeld robot systeem [49], zie figuur 25 (links). Om te onderzoeken in hoeverre de baan-volnauwkeurigheid van



Figuur 25: (links) Fast and Accurate Manipulator Module (FAMM), (rechts) Vergelijking van behaalde baan-volnauwkeurigheden met verschillende verstoringsonderdrukkingstechnieken

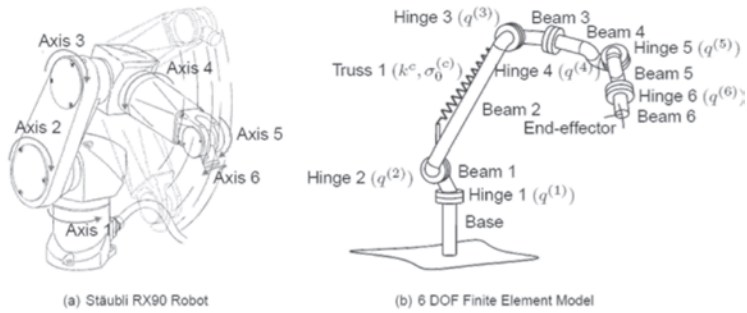
robotsystemen kan worden verbeterd, zijn een aantal verstoringsonderdrukkingstechnieken geïmplementeerd in dit nieuw ontwikkelde besturingsysteem. Dit zijn achtereenvolgens: de Disturbance Observer (DO), Iterative Learning Control (ILC), Path Independent Learning (PIL), Adaptive Harmonic Control (AHC) en een combinatie van een Disturbance Observer met Path Independent Learning (DO+PIL). De resultaten van de experimenten zijn verzameld in figuur 25 (rechts) waarin zowel de gemiddelde volgfout als de maximum volgfout zijn weergegeven in de vorm van staafdiagrammen. Ter vergelijking zijn ook de resultaten van een standaard PID controller opgenomen. De maximaal toelaatbare baan-volnauwkeurigheid van 0.05mm die nodig is voor laserlassen, is gemarkeerd door een horizontale gestreepte lijn. De experimentele re-

sultaten laten zien dat iteratief lerend regelen (Iterative learning Control, ILC) veruit het beste presteert. Voor het beschouwde test-traject met een snelheid van 0.5 m/sec, wordt met ILC de maximale baanvolgfout beperkt tot 0.022mm. Hiermee is ruimschoots voldaan aan de vereiste baan-volgnauwkeurigheid voor laserlassen. Een verklaring voor de goede prestaties van ILC is dat de repetiteernauwkeurigheid van robots in het algemeen veel beter is dan hun absolute nauwkeurigheid. ILC verkleint de volgfout langs een traject dat herhaaldelijk wordt afgelegd door het stuursignaal voor de robot te corrigeren met de volgfout uit het vorige traject.

Met ILC zou het mogelijk moeten zijn om industriële robots, uitgerust met commercieel verkrijgbare naad-detectiesensoren, in te zetten bij het laserlassen. Om dat te realiseren hebben we een programma opgezet voor de ontwikkeling van een gerobotiseerde laserlascel voor het lassen van drie-dimensionale lasnaden met zes-assige industriële robots. Daarvoor moesten een aantal problemen worden opgelost. Deze hadden betrekking op zowel een efficiënte werkvoorbereiding (off-line programmering), als op de implementatie van een gerobotiseerde laserlascel.

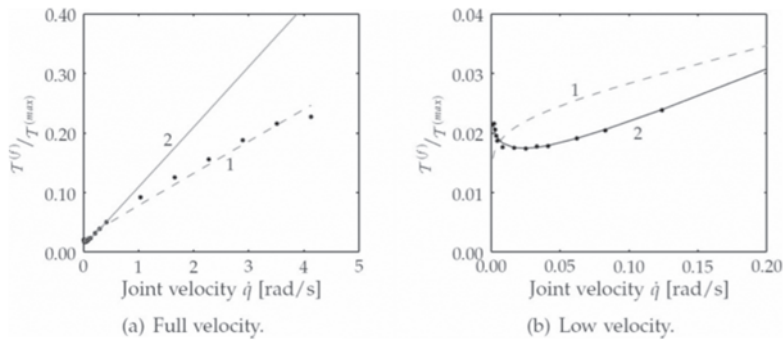
7.3 OFF-LINE PROGRAMMERING

Om op voorhand te kunnen bepalen of een product met een robot kon worden gelast maakten we gebruik van off-line programmeersystemen. Bestaande systemen gebruiken kinematische modellen om de robotbeweging te simuleren. De resultaten hiervan zijn te onnauwkeurig om een voorspelling te kunnen doen van de laser-lasbaarheid. Door het toevoegen van dynamische simulatie van de robotbeweging werd het mogelijk om lasnaadvolgfouten met de vereiste nauwkeurigheid te kunnen voorspellen. Rob Waiboer [34], heeft van de Staubli RX90B robot een dynamisch model gemaakt in SPACAR, voorzien van regelbaar en aandrijving, inclusief de wrijving van robotassen, zie figuur 26.

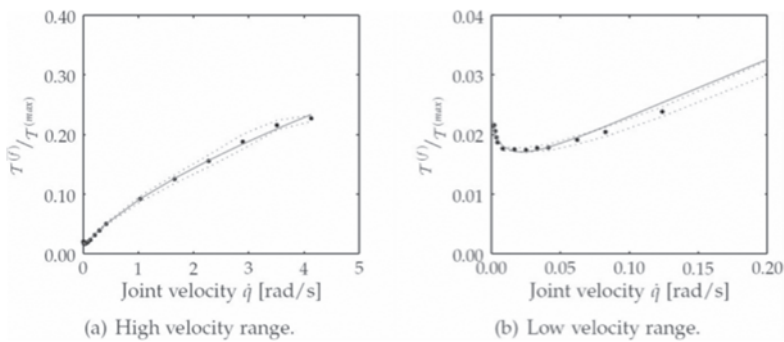


Figuur 26: (a) Staubli RX90B robot, (b) SPACAR model

Metingen lieten zien dat bestaande wrijvingsmodellen uit de robotliteratuur die zijn gebaseerd op Coulombse- en viskeuze modellen onvoldoende nauwkeurig zijn zoals blijkt uit figuur 27. In deze figuur zijn de gemeten en berekende asmomenten weergegeven voor het volledige snelheidsbereik (0-5 rad/sec) en het lage snelheidsbereik (0-0.20 rad/sec). De parameters van model (1) zijn geschat voor het volledige snelheidsbereik en die van model (2) zijn geschat voor het lage snelheidsbereik. Geen van beide modellen is in staat om de wrijving met voldoende nauwkeurigheid te beschrijven voor het gehele snelheidsbereik. Omdat wrijving een significante bijdrage levert aan de asmomenten was een verbeterd wrijvingsmodel noodzakelijk. Op basis van inzichten uit de tribologie ontwikkelden we een nieuw wrijvingsmodel dat de wrijving in gesmeerde en voorgespannen lagers en tandwieloverbrengingen beschrijft [36]. Modellen voor de viskeuze wrijving en de wrijving tengevolge van ruwheidscontacten werden gecombineerd in twee wrijvingsmodellen; een voor tandwieloverbrengingen en een voor de voorgespannen rollagers. Deze modellen werden vervolgens weer gecombineerd tot een wrijvingsmodel voor de asmomenten.



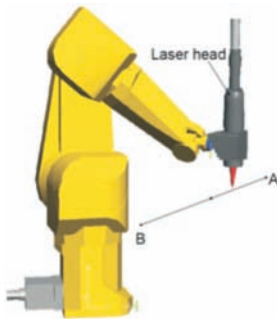
Figuur 27: Gemeten en berekende Stribeck curves van de asmomenten van scharnier 1 op basis van Coulombse- en viskeuze wrijvingsmodellen uit de robot literatuur. De punten (•) representeren de gemeten waarden.



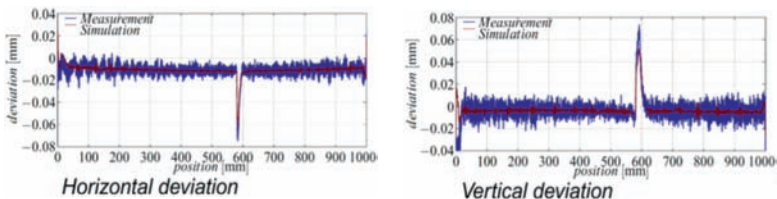
Figuur 28. Gemeten en berekende Stribeck curves van de asmomenten van scharnier 1 met modellen ontwikkeld op basis van inzichten uit de tribologie. De punten (•) representeren de gemeten waarden.

Figuur 28 toont de gemeten en geschatte Stribeck curves voor de asmomenten van scharnier 1, op basis van dit nieuwe wrijvingsmodel. Dit model is in staat om de wrijving nauwkeurig te beschrijven in het volledige snelheidsregime. Het model is vervolgens uitgebreid met een beschrijving die ook het gedrag beschrijft tijdens het omkeren van de bewegingsrichting van de robot as. Alle parameters van het model zijn bepaald door middel van parameteridentificatie.

Om de simulatietijd te verkorten is een perturbatie methode toegepast [35]. Hierbij wordt de beweging van de robot opgesplitst in een nominale beweging en kleine variaties op deze beweging als gevolg van verstoringen. De variaties worden berekend met behulp van de gelineariseerde bewegingsvergelijkingen. Dit levert voor een interne klokfrequentie van 4 kHz, een factor tien aan vermindering in simulatietijd. Figuur 30 toont de gesimuleerde en gemeten lasnaadvolgfouten in horizontale en verticale richting van de rechte lasnaad AB in figuur 29. De maximale fout ter plaatse van de snelheidswisselingen in de scharnieren 2 en 3 blijft binnen de tolerantie waarde (0.1mm) voor laserlassen.



Figuur 29: Rechte lasnaad AB, gelast met een snelheid van 100mm/sec.

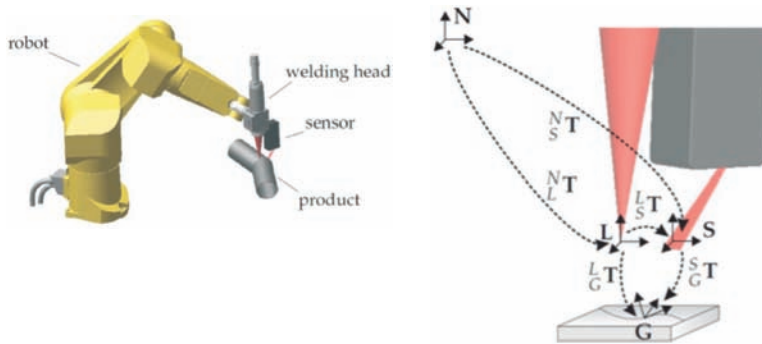


Figuur 30: Gesimuleerde en gemeten lasnaad-volgfouten

7.4 LASERLASCEL

Bij de implementatie van een laserlascel moesten een aantal componenten worden geïntegreerd. Dat betrof allereerst de laserbron. Een voor de hand liggende keuze was de Nd:YAG laser waarvan het licht door een glasfiber wordt geleid en door een optisch systeem op het werkstuk wordt gefocuseerd. De robot moet dat focuspunt ten opzichte van de lasnaad positioneren. Het realiseren van de vereiste nauwkeurigheid was echter niet zo eenvoudig. De produkten kunnen afwijken van de ontwerp-tekening en ook de positionering van de lasnaden ten opzichte van de robot is niet exact bekend. De oplossing moest worden gevonden in het integreren van optische naaddetectie sensoren die met het laserfocus meebewegen. Eventuele baan-volgfouten konden zo worden gemeten en gecorrigeerd. De verbetering van de baan-volgnauwkeurigheid zou worden gerealiseerd door gebruik te maken van iteratief lerend regelen. Voor de uitvoering van dit zeer uitdagende programma werden drie Aio's aangesteld.

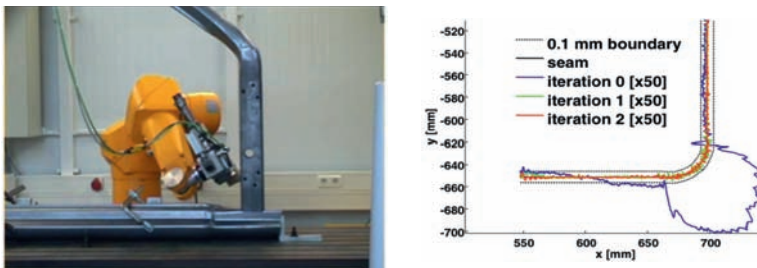
Menno de Graaf [37,38], ontwikkelde een real-time optisch naad-volgsysteem. De naad-detectiesensor werd aan de laskop gemonteerd op enige afstand van het laser-focus, zie figuur 31 (links). Een probleem dat moest worden opgelost is dat de sensormetingen moeten worden getransformeerd van het sensor-coördinatensysteem (S) naar het laser-coördinatensysteem (L), rekening houdend met het feit dat de sensor op een andere positie meet dan waar de correcties nodig zijn, zie figuur 31 (rechts). Deze transformaties worden bepaald met behulp van speciaal voor dit doel ontwikkelde tool calibratie-procedures. Met dit naad-volgsysteem kunnen lasnaden automatisch worden ingeleerd. Dit inleren wordt tijdens een continue beweging van de robot uitgevoerd en vereist een nauwkeurige synchronisatie van sensor- en robotsysteem. Om zowel de vereiste lassnelheid als de benodigde baan-volgnauwkeurigheid te bereiken ontwikkelde Wouter Hakvoort



Figuur 31: Laskop met naad-detectiesensor (links), coördinatensystemen (rechts)

[39,40,41], een nieuw ILC-algoritme en implementeerde dit algoritme op de industriële Staubli RX90 robot. Figuur 32 (links) toont de gerobotiseerde laserlascel voorzien van een 3D naad-volgsysteem en een iteratief lerend regelsysteem voor het realiseren van de vereiste naadvolg-nauwkeurigheid.

Figuur 32 (rechts) toont een lasnaadtraject dat moet worden gevolgd door het laserfocus van de laskop die is bevestigd aan de robot. De laskop heeft een vaste oriëntatie ten opzichte van de lasnaad, zodat deze mee moet draaien in het cirkelvormige deel van de naad. De gestippelde lijnen markeren de tolerantiegrenzen (0.1mm) voor laserlassen.

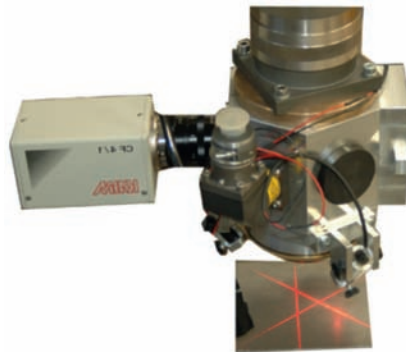


Figuur 32: Gerobotiseerde laserlascel (links), naadvolgfouten voor verschillende iteraties (rechts)

De lassnelheid is 350 mm/sec. Na de eerste iteratie is de vereiste nauwkeurigheid voor laserlassen al bijna bereikt. Dit resultaat laat zien dat de volgnauwkeurigheid van industriële robots aanzienlijk kan worden verbeterd met ILC. Door in het ILC-algoritme gebruik te maken van robotmodellen voor de standsafhankelijke dynamica van de robot, kunnen frequentiecomponenten van de volgfout boven de bandbreedte van de regelaar worden gereduceerd. Deze standafhankelijke dynamica wordt beschreven met behulp van lineair tijdsvariërende (LTV)modellen. Deze modellen worden bepaald met behulp van systeemidentificatie en zijn alleen geldig voor het beschouwde lasnaadtraject. De beschikbaarheid van dynamische robotmodellen die in staat zijn om de hoog frequente dynamica langs elk willekeurig traject te beschrijven zou de toepassing van deze ILC-technieken aanzienlijk vereenvoudigen. Toon Hardeman [42,43], heeft de modelstructuur van zulke modellen geformuleerd, maar de identificatie van de modelparameters is nog onderwerp van onderzoek.



Figuur 33: Laserlassen van complexe lasnaden met acht-assige laserlascel



Figuur 34: Laserlaskop met geïntegreerde naad-detectiesensor

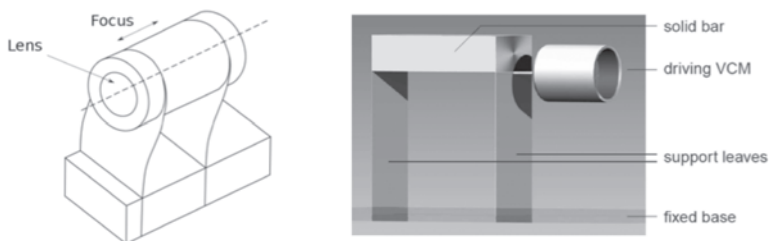
Combinatie van een zes-assige robot met een twee-assige rotatietafel maakt het mogelijk om complexe producten te lassen, zie figuur 33. Een procesregeling is toegevoegd aan dit systeem om de lasdiepte on-line te controleren.

De door ons gebruikte commerciële naad-detectiesensor is gebaseerd op optische triangulatie met één enkele gestructureerde lichtlijn. Dit legt beperkingen op aan de oriëntatie van de laskop ten opzichte van de lasnaad. De vorm van de lasnaad in combinatie met de vereiste lassnelheid, zal resulteren in extra positioneringsfouten tengevolge van het draaien van de laskop. Bovendien kunnen gesloten lasnaadtrajecten zoals cirkels niet worden ingeleerd. Dimitrios Iakovou [44], heeft een nieuw type naad-detectiesensor ontwikkeld die gebruikmaakt van drie gestructureerde lichtlijnen. De sensor is geïntegreerd in de laskop, zie figuur 34. Deze sensor maakt detecteren en het volgen van de lasnaadtrajecten mogelijk zonder beperkingen op te leggen aan de oriëntatie van de laskop. Hierdoor worden positioneringsfouten ten gevolge van de rotatie van de laskop voorkomen.

8. MODELVORMING VOOR MECHATRONISCH ONTWERPEN

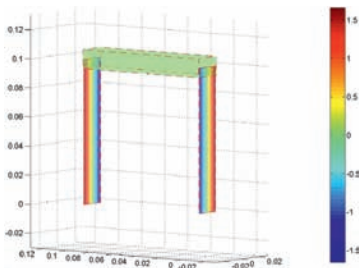
Naast het vakgroepbrede thema “gerobotiseerd laserlassen” heb ik me vooral de laatste jaren bezig gehouden met een nieuwe onderzoekslijn in mijn groep gericht op de modelvorming voor mechatronisch ontwerpen. Voor het ontwerpen van een mechatronisch systeem is het noodzakelijk om te beschikken over een dynamisch model met een minimaal aantal vrijheidsgraden dat de relevante dynamische eigenschappen van het mechanische systeem beschrijft. Voor systeem analyse is een gelineariseerde input-output representatie nodig op basis waarvan overdrachtsfuncties en Bode plots kunnen worden gecreëerd [45]. De multibody formulering gebaseerd op de eindige elementen

methode is een zeer geschikte methode voor het creëren van zulke modellen. Deze formulering is daarnaast ook aantrekkelijk voor analyse van de kinematische en statische eigenschappen van mechanische systemen. Dit is bijvoorbeeld van belang bij het ontwerpen van elastische precisiemechanismen. In deze mechanismen wordt wrijving geëlimineerd door het toepassen van elastische scharnieren en rechtgeleidingen. De elastische componenten hebben een lage stijfheid in de richting waarin beweging is gewenst en een hoge stijfheid in de richtingen waarin geleiding is gewenst. Om reproduceerbaar gedrag te bewerkstelligen is het van belang om statische onbepaaldheden te vermijden. In een statisch onbepaald mechanisme kunnen geringe uitlijnfouten grote veranderingen veroorzaken in het dynamisch gedrag (eigenfrequenties en stijfheden) van het systeem. In het vak “Constructie Principes” [48], leren studenten kinematische ontwerpprincipes toe te passen om daarmee statische onbepaaldheden te vermijden. Echter voor complexe systemen is het vaak moeilijk om statische onbepaaldheden te detecteren. We hebben een analysegereedschap ontwikkeld in SPACAR waarmee kinematische en statische onbepaaldheden kunnen worden gedetecteerd door ze te visualiseren aan de hand van ongedefinieerde bewegingsvormen en fictieve statisch onbepaalde spanningsverdelingen [46]. Ik zal dit demonstreren aan de hand van een voorbeeld van een eenvoudig rechtgeleidings-mechanisme van een elektronisch focusseersysteem, dat is afgebeeld in figuur 35 (links).

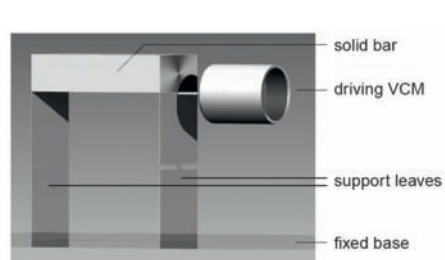


Figuur 35: Parallel rechtgeleidings-mechanisme (links), kinematisch model (rechts)

Het systeem bestaat uit een lens ondersteund door twee bladveren. De lens wordt aangedreven door een Voice Coil Motor (VCM). Figuur 35 (rechts) toont een kinematisch model waarbij de lens is gemodelleerd als een onvervormbaar balkelement en de beide bladveren als elastische balkelementen. Voor elk balkelement worden zes onafhankelijke discrete deformaties gedefinieerd. De bladveren laten een beweging toe in de richting met lage stijfheden, terwijl de beweging in de richtingen met hoge stijfheden wordt onderdrukt. Voor de kinematische en statische analyse worden de discrete deformaties verbonden met hoge stijfheden onderdrukt, terwijl de deformaties verbonden met lage stijfheden worden vrijgelaten. Volgens Grübler's mobiliteitscriterium levert dit een kinematisch model met precies nul vrijheidsgraden. Dit is niet wat we verwachten, de lens kan immers een horizontale beweging maken. Dit betekent dat er één statische overbepaaldheid in het systeem aanwezig moet zijn. Met behulp van singuliere waarden-decompositie berekenen we vervolgens de bijbehorende fictieve statisch onbepaalde buigspanningen in de beide bladveren, op basis waarvan de statische onbepaaldheid kan worden gedetecteerd, zie figuur 36.



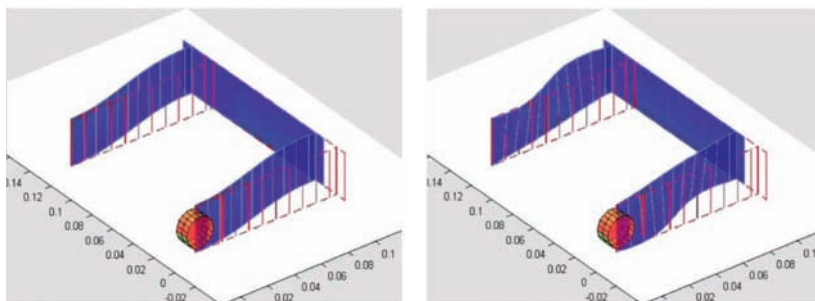
Figuur 36: Statisch onbepaalde spanningsverdeling



Figuur 37: Model met inkeping in een van de bladveren

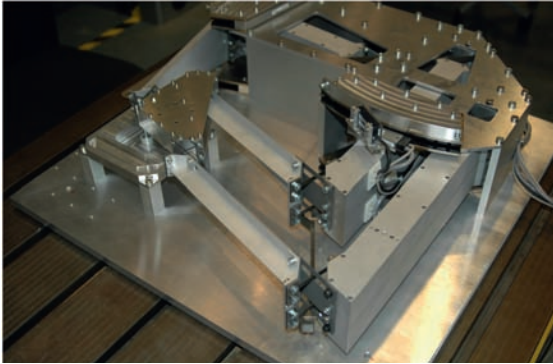
De overbepaaldheid kan worden weggenomen door het aanbrengen van een inkeping in een van de bladveren zoals aangegeven in figuur 37. Met behulp van SPACAR is het elastische verplaatsingsveld van de

bladveren berekend voor het geval van een perfecte- en een foutieve uitlijning van de ondersteuning, zie figuur 38. De uitlijnfout wordt aangebracht via een scharnierelement ter plaatse van één van de ondersteuning. Jaap Meijaard [47], heeft aangetoond dat het systeem instabiel wordt als de uitlijnfout een zekere kritische waarde overschrijdt.



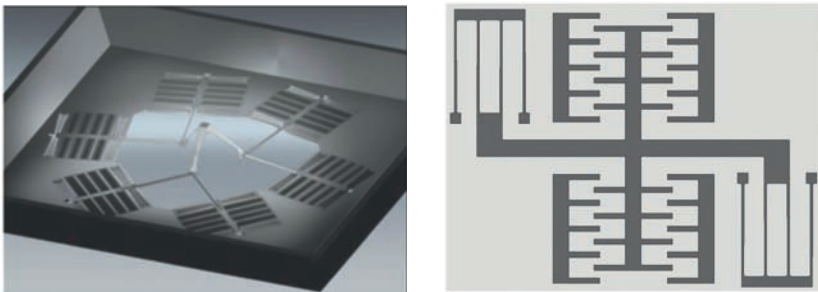
Figuur 38: Verplaatsing lens voor correcte uitlijning (links), foutieve uitlijning (rechts)

In de hightech industrie wordt momenteel gewerkt aan de ontwikkeling van mechatronische systemen voor het nauwkeurig positioneren in vacuüm. Eén van de oplossingen hiervoor is de toepassing van mechanismen met elastische scharnieren die een grote slag kunnen maken. Figuur 39 toont een prototype van een elastisch positioneermechanisme met twee vrijheidsgraden die worden geactueerd door twee Lorentz actuatoren. De scharnieren zijn uitgevoerd als kruisveerscharnieren. Tijdens het ontwerpproces is het systeem voortdurend geanalyseerd op statische onbepaaldheden zodat het uiteindelijke ontwerp voldoet aan de voorwaarden voor reproduceerbaar gedrag. Steven Boer [53], heeft van dit mechanisme een dynamisch model gemaakt in SPACAR waarbij de kruisveerscharnieren zijn gemodelleerd met elastische balkelementen en de armen als twee-knoops superelementen. Het mechanisme is ontworpen door twee afstudeerstudenten onder leiding van Herman Soemers en Dannis Brouwer.



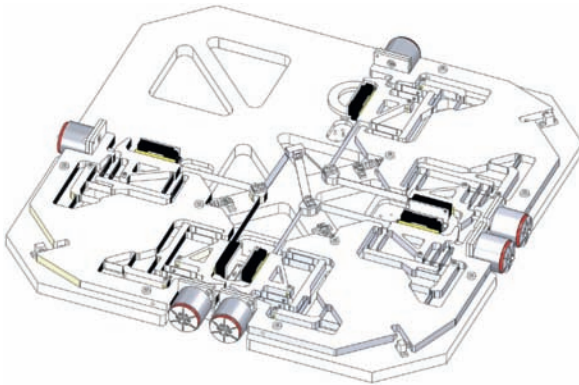
Figuur 39: Positioneermechanisme met elastische scharnieren.

Figuur 40 (links) toont een micromanipulator vervaardigd met behulp van MEMS (Micro Electromechanical Systems) -technologie. Dit is een precisie-manipulator met zes elastische vrijheidsgraden die worden geactueerd door zes electrostatische kamactuatoren, zie figuur 40 (rechts). Het ontwerp is afkomstig uit het proefschrift van Dannis Brouwer [50]. Met deze manipulator worden preparaten, geplaatst op de end-effector, met nanometer-resolutie gepositioneerd in een Transmission Electron Microscope (TEM). MEMS-technologie maakt het mogelijk om sensoren en actuatoren te integreren in het mechanisme.

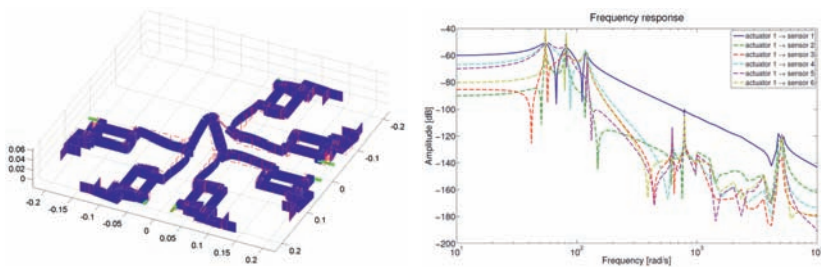


Figuur 40: Micromanipulator gefabriceerd met MEMS-technologie (links), elastisch recht-geleidingsmechanisme van een comb-drive actuator (rechts)

Vanwege de geringe afmetingen van deze manipulator (enkele millimeters) is het moeilijk om hiermee te experimenteren. Daarom is een vergrote versie (100 x) ontworpen waarvan een afbeelding is weergegeven in figuur 41. Van dit ontwerp is een SPACAR model gemaakt. De onderstaande figuren 42 illustreren een trillingsmode en Bode plots van dit vergrote systeem.



Figuur 41: Micromanipulator, vergrote uitvoering (100x)



Figuur 42: Trillingsvorm en Bode plots.

9. TOT SLOT

Het zal u duidelijk zijn geworden, dat ik in het voorgaande in zekere zin verantwoording heb afgelegd over wat een hoogleraar volgens mij bovenal hoort te doen: het verder brengen van het vakgebied en het opleiden en inspireren van jonge mensen. Enerzijds om ingenieurs af te leveren voor de industrie die hiervan voor haar voortbestaan afhankelijk is, anderzijds om jonge mensen zo ver te brengen dat zij op zelfstandige wijze wetenschappelijk onderzoek kunnen doen. Het beroep van hoogleraar is een bevoorrechte bezigheid waar ik veel plezier aan heb beleefd. Dat plezier bestond uit twee aspecten. Het wetenschappelijk speur- en denkwerk gaf mij veel genoegen, maar niet minder nog de dagelijkse contacten met medewerkers en studenten. Ik ben de Universiteit Twente veel dank verschuldigd voor het feit, dat zij mij de gelegenheid heeft geboden mijn passie en beroep te combineren. Mijn afscheid zal daarom nog niet definitief zijn. In het najaar ga ik nog de DISC-cursus "Flexible multibody system analysis for control purposes" verzorgen samen met Ronald Aarts en Johannes van Dijk. In het voorjaar van 2012 organiseren we het EUROMECH Colloquium "Multibody system modelling, control and simulation for engineering design", hier op de UT. Gedurende de afgelopen 15 jaar heb ik het vak dynamica van machines gedoopt aan de hand van een zelf geschreven dictaat. Samen met Ronald Aarts en Jaap Meijaard werk ik aan een vernieuwde versie die gaat resulteren in een boek. Tenslotte begeleid ik nog een van onze promovendi, Steven Boer.

De speurtocht naar HOE DE DINGEN WERKEN zal worden voortgezet. Ik wens iedereen daar veel succes mee en heb er alle vertrouwen in dat verdere successen niet uit zullen blijven. Mensen, bedankt voor jullie grote steun en inzet om de vakgroep te maken tot wat ze nu is. Tenslotte wil ik nog één persoon bedanken. Lieve Joke, ik heb altijd veel tijd voor mezelf opgeëist, en daar gaf je me alle ruimte voor. Dat, en je rol van kritisch klankbord heeft voor mij veel mogelijk gemaakt. Ik dank jullie allen voor jullie aanwezigheid hier, en sluit daarmee mijn college af.

REFERENTIES

- [1] J.B.Jonker, Dynamic response of a clamped/free hollow circular cylinder under traveling torsional impact loads, *Nuclear Engineering and Design* 67 pp.191-201, 1981
- [2] Besseling, J F, The Complete Analogy Between the Matrix Equations and the Continuous Field Equations of Structural Analysis, in *International Symposium on Analogue and Digital Techniques Applied to Aeronautics · Proceedings*, Presses Académiques Eu, pp. 223-242, 1964
- [3] J.F.Besseling, Non-linear theory for elastic beams and rods and its finite element representation. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 12, 205–220, 1982
- [4] K. van der Werff, Kinematic and dynamic analysis of mechanisms, a finite element approach, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, 1977
- [5] A.L.Schwab, Dynamica van mechanismen met vervormbare schakels, Master Thesis, LTM report nr. 758, Laboratory for Engineering Mechanics, Delft University of Technology, 1983
- [6] K. van der Werff, J.B.Jonker, Dynamics of flexible mechanisms. In: Hang, E.J. (ed.) *Proceedings of Computer Aided Analysis and Optimization of Mechanical System Dynamics*, pp. 381–400. Springer, Berlin, 1984
- [7] J.B.Jonker, A finite element dynamic analysis of flexible spatial mechanisms and manipulators, Ph.D. Thesis, Delft University, The Netherlands, 1988
- [8] J.B.Jonker, A finite element dynamic analysis of flexible spatial mechanisms and manipulators. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 76, 17–40, 1989
- [9] J.B.Jonker, Linearization of dynamic equations of flexible mechanisms—a finite element approach. *Int. J. Numer. Methods Eng.* 31(7), 1375–1392, 1991
- [10] J.B.Jonker, J.P. Meijaard, SPACAR-computer program for dynamic analysis of flexible spational mechanisms and manipulators. In: Schiehlen, W. (ed.) *Multibody Systems Handbook*, pp. 123–143. Springer, Berlin, 1990
- [11] J.P.Meijaard, Direct determination of periodic solutions of the dynamic equations of flexible mechanisms and manipulators, *Int. J. Numer. Methods Eng.* 32, 1691–1710, 1991
- [12] J.P.Meijaard, Validation of flexible beam elements in dynamic programs, *Nonlinear Dyn.* 9, 21–36, 1996

- [13] J.B.Jonker, A finite element dynamic analysis of flexible manipulators, *Internat. J. Robotics Res.* 9, 1990, 59–74.
- [14] F.C.Visser, On the flow in centrifugal impellers, Ph.D. Thesis, University of Twente, The Netherlands, 1996
- [15] F.C.Visser, J.J.H. Brouwers, J.B. Jonker, Fluid flow in a rotating low-specific-speed centrifugal impeller passage, *Fluid Dynamic Research* vol. 24 (5), pp. 275-292, 1999
- [16] R.Badie, Analysis of unsteady potential flows in centrifugal pumps. Analytical and finite element calculations in a centrifugal volute pump, Ph.D. Thesis, University of Twente, The Netherlands, 1993
- [17] R.Badie, J. B. Jonker and T. G. van Essen, Calculations on the time-dependent potential flow in a centrifugal pump, ASME paper 92-GT-151, International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, Cologne, Germany, June 1-4, 1992.
- [18] R.Badie, J.B. Jonker and R.A. van den Braembussche, Finite element calculations and experimental verification of unsteady potential flow in a centrifugal pump, *Int. J. Numer. Methods Fluids*, 19, pp. 1083–1102, 1994
- [19] B.P.M. van Esch, Simulation of three-dimensional unsteady flow in hydraulic pumps, Ph.D. Thesis, University of Twente, The Netherlands, 1997
- [20] N.P. Kruyt, B.P.M. van Esch, J.B. Jonker, A superelement-based method for computing unsteady three-dimensional potential flows in hydraulic turbomachines. *Comm. Numer. Methods Eng.* 15, 381–397, 1999
- [21] N.P.Kruyt, COMPASS 4.00, User manual, University of Twente, The Netherlands, 2003
- [22] B.P.M. van Esch, and N.P. Kruyt, Hydraulic performance of a mixed-flow pump: unsteady inviscid computations and loss models, *ASME J. Fluids Eng.*, 123, pp. 256–264, 2001
- [23] M.J. van Os, On the flow and cavitation inception of mixed-flow impellers, Ph.D. Thesis, University of Twente, The Netherlands, 1998
- [24] M.J. van Os, J.G.H. Op de Woerd, J.B. Jonker, A parametric study of the cavitation inception behavior of a mixed-flow impeller, using a three-dimensional potential flow model, *Proc. Third international symposium on pumping machinery*, ASME FED Summer Meeting, Vancouver, Canada, 1997

- [25] T. G. van Essen, 'Fluid-induced impeller forces in centrifugal pumps', Ph.D. Thesis, University of Twente, The Netherlands, 1995.
- [26] J. B. Jonker and T. G. van Essen, 'A finite element perturbation method for computing fluid-induced forces on a centrifugal impeller rotating and whirling in a volute casing', *Int. j. numer. methods eng.*, 29, 269-294, 1997.
- [27] R.G.K.M. Aarts, J.B. Jonker, The computation of fluid-induced forces on centrifugal impellers rotating and whirling in a volute casing, *Proc. Third international symposium on pumping machinery, ASME FED Summer Meeting, Vancouver, Canada, 1997*
- [28] S. Postma, *Weld Pool Control in Nd:YAG Laser Welding*, Ph.D. Thesis, University of Twente, The Netherlands, 2003
- [29] S. Postma, R. G. K. M. Aarts, Johan Meijer, and J. B. Jonker, Penetration control in laser welding of sheet metal, *Journal of Laser Applications* 14 (4) pp. 210-214, 2002.
- [30] B.J. Aalderink, *Sensing, monitoring and control for laser based welding of aluminium sheets*, Ph.D. Thesis, University of Twente, The Netherlands, 2007
- [31] B.J. Aalderink, D.F. de Lange, R.G.K.M. Aarts, J. Meijer, Keyhole shapes during laser welding of thin metal sheets, *Journal of Physics D: Applied Physics* 40 (17) pp. 5388-5393, 2007
- [32] E. Schrijver, *Improved Robot Tracking Control for Laser Welding, Disturbance Estimation and Compensation*, Ph.D. Thesis, University of Twente, The Netherlands, 2002
- [33] E. Schrijver, J. van Dijk, Disturbance observers for rigid mechanical systems: equivalence, stability and design, *Journal of Dynamic System, Measurement and Control* 124 (4) pp. 539-548, 2002
- [34] R.R. Waiboer, *Dynamic modelling, identification and simulation of industrial robots for off-line programming of robotised laser welding*, Ph.D. Thesis, Universiteit Twente, the Netherlands, 2007
- [35] R.R. Waiboer, R.G.K.M. Aarts and J.B. Jonker, Application of a perturbation method for realistic dynamic simulation of industrial robots, *Multibody Systems Dynamics* 13 (3) pp. 323-338, 2005
- [36] J.B. Jonker, R.G.K.M. Aarts and R.R. Waiboer, Modelling of joint friction in robotic manipulators with gear transmissions, pp. *Multibody Dynamics - Computational*

- Methods and Applications. Vol. 4 of Computational Methods in Applied Sciences, Ed. J.C. Garcia Orden, Jose M. Goicolea, J. Cuadrado, Springer, pp.221-243, 2007
- [37] M.W. de Graaf, Sensor-guided Robotic Laser Welding, Ph.D. Thesis, University of Twente, The Netherlands, 2007
- [38] M.W. de Graaf, R.G.K.M. Aarts, J.B. Jonker, J. Meijer, Real-time seam tracking for robotic laser welding using trajectory-based control, *Control Engineering Practice* 18 (8) pp. 944-953, 2010
- [39] W.B.J. Hakvoort, Iterative learning control for LTV systems with applications to an industrial robot, Ph.D. Thesis, University of Twente, The Netherlands, 2009
- [40] W.B.J. Hakvoort, R.G.K.M. Aarts, J. van Dijk, J.B. Jonker, Lifted system iterative learning control applied to an industrial robot, *Control Engineering Practice* 16 (4) pp. 377-391, 2008
- [41] W.B.J. Hakvoort, R.G.K.M. Aarts, J. van Dijk, J.B. Jonker, A computationally efficient algorithm of iterative learning control for discrete-time linear time-varying systems, *Automatica* 45 (12) pp. 2925-2929, 2009
- [42] T. Hardeman, Modelling and Identification of Industrial Robots including Drive and Joint Flexibilities, Ph.D.Thesis, University of Twente, The Netherlands, 2008
- [43] T. Hardeman, R.G.K.M. Aarts, J.B. Jonker, A finite element formulation for dynamic parameter identification of robot manipulators, *Multibody Systems Dynamics* 16 (1) pp. 21-35, 2006
- [44] D. Iakovou, Sensor development and integration for robotized laser welding , Ph.D. Thesis, University of Twente, February, 5, 2009
- [45] J.B. Jonker, R.G.K.M. Aarts, J. van Dijk, A linearized input-output representation of flexible multibody systems for control synthesis, *Multibody System Dynamics* 21 (2) pp. 99-122, 2009
- [46] R.G.K.M. Aarts, J. van Dijk and J.B. Jonker, Flexible multibody modelling for the mechatronic design of compliant mechanisms, The 1st Joint International Conference on Multibody System Dynamics, Lappeenranta, Finland, 2010
- [47] J.P. Meijaard, D.M. Brouwer, J.B. Jonker, Analytical and experimental investigation of a parallel leaf spring guidance, *Multibody System Dynamics* 23(1) pp. 77-97, 2010
- [48] H.M.J.R. Soemers, Design Principles for Precision Mechanisms, 978-90-365-3103-0, T-Point Print VoF, 15-12-2010, 2010

- [49] H.M.J.R. Soemers, FAMM: Fast and Accurate Manipulator Modules. Technical Report C.T.R. 545.91.0122, CFT Philips, Eindhoven, The Netherlands, 1990.
- [50] D.M. Brouwer, Design Principles for Six Degrees-of-Freedom MEMS-based Precision Manipulators, Ph.D.Thesis, University of Twente, The Netherlands, 2007
- [51] G. Nijssse, A subspace based approach to the design, implementation and validation of algorithms for active vibration control, Ph.D. Thesis, University of Twente, The Netherlands, 2006
- [52] G.W van der Poel, An exploration of active hard mount vibration isolation for precision equipment , Ph.D. Thesis, University of Twente, May, 21, 2010
- [53] S.E. Boer, R.G.K.M. Aarts, J.P. Meijaard, D.M. Brouwer and J.B. Jonker, A two-node superelement description for modelling of flexible complex-shaped beam-like components, Ecomas Thematic Conference Multibody Dynamics, 2011

