

Mechatronica 2.0 : balanceren van complexiteit op componentniveau

Citation for published version (APA):

Vermeulen, J. P. M. B. (2016). *Mechatronica 2.0 : balanceren van complexiteit op componentniveau*. Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 13/05/2016

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.

Intreerede
prof.dr.ir. Hans Vermeulen
13 mei 2016



/ Faculteit Werktuigbouwkunde

TU / **e**

Technische Universiteit
Eindhoven
University of Technology

Mechatronica 2.0

Balanceren van complexiteit op componentniveau

Where innovation starts

Intreerede prof.dr.ir. Hans Vermeulen

Mechatronica 2.0

Balanceren van complexiteit op componentniveau

Uitgesproken op 13 mei 2016
aan de Technische Universiteit Eindhoven

Historisch perspectief

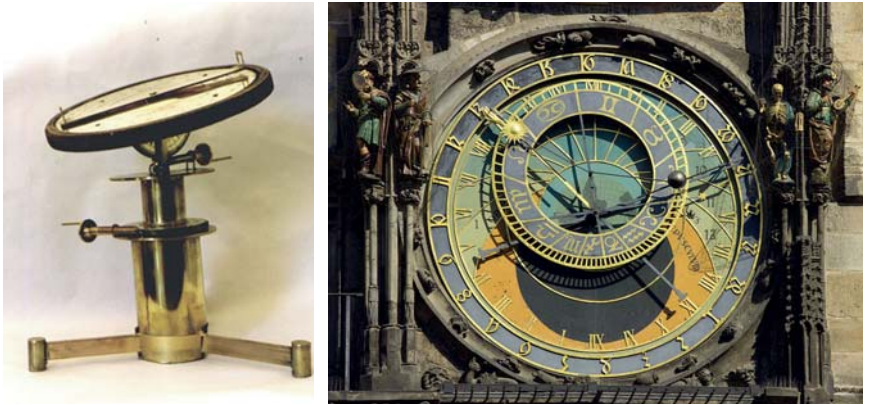
“A lot of people in our industry haven’t had very diverse experiences. So they don’t have enough dots to connect, and they end up with very linear solutions without a broad perspective on the problem. The broader one’s understanding of the human experience, the better design we will have.” – Steve Jobs.

Mijnheer de Rector Magnificus, dames en heren,

Het nog betrekkelijk jonge vakgebied Mechatronica heeft over de afgelopen decennia een grote ontwikkeling doorgemaakt. Als gevolg van een synergetische combinatie van precisiemechanische technologie en elektronische aansturing, zijn nieuwe concepten en architecturen bedacht voor machines en instrumenten en voor consumentenelektronica. De laatste jaren zien we vanwege steeds strengere eisen aan de prestaties van subsystemen en componenten, steeds meer behoefte aan verdergaande integratie van meerdere aangrenzende vakgebieden. Complexiteit schuift op van machine- naar componentniveau. In mijn rede ga ik vanuit historisch perspectief in op, wat ik noem, ‘Mechatronica 2.0’, dat een verdergaande balancering vraagt van complexiteit ten behoeve van beheersing van bewegingen op atomaire schaal.

Precisietechnologie

Vanuit het huidige historisch overzicht liggen de wortels van precisietechnologie een paar honderd jaar voor Christus in technieken om graden- en circulaire schaalverdelingen te maken. Deze technieken werden gebruikt in de astronomie en landmeetkunde en in de 13^e eeuw opgepikt door mechanische horloge- en klokkenmakers in Europa. Volgens Lewis Mumford is het de klok, en niet de stoommachine, die de basis vormt van het moderne industriële tijdperk. Horlogemakerij markeert perfectie en heeft de techniek voortgebracht van het werken met nauwkeurige toleranties en afwerking, die in de precisietechnologie zijn overgenomen en toegepast op grotere systemen met hogere relatieve nauwkeurigheden. Zo werd de eerste diffractie-tralie gemaakt door David Rittenhouse, een getrainde klokkenmaker in de 18^e eeuw, en pionierden John Harrison en George Graham in die tijd al met de techniek van thermische foutcorrectie [1].



Figuur 1

Hero's dioptra (links), gebouwd rond 60 AD en voorloper van de moderne theodoliet, gebruikt voor nauwkeurige landmeetkundige metingen. De oudste nog werkende astronomische klok uit 1410 (rechts) op het oude stadhuis van Praag, Tsjechië.

De term 'precisietechnologie' (vrij vertaald '*precision engineering*') wordt vanaf de jaren zestig van de vorige eeuw geassocieerd met precisiefabricage en bewerkingsprocessen, als draaien, frezen, slijpen en polijsten, inclusief de uitgebreide geometrische- en oppervlaktemetrologie om de kwaliteit van het fabricage- of bewerkingsproces te controleren en te verbeteren. Halverwege de jaren 1980 constateerde Jim Bryan dat *precision engineering* een volwassen technologie was geworden zonder rigoureuze doorbraken in de 20^e eeuw, met uitzondering van Johansson's precisie-eindmaten en de commerciële laserinterferometer [2]. Ontwikkelingen in precisietechnologie verliepen stapsgewijs en er ging steeds enige tijd overheen, voordat een nieuwe technologie zijn intrede had gemaakt en was doorgedrongen. Er is geen sprake van een logische en continue genetische evolutie van elkaar opvolgende gebeurtenissen. Abbott Usher spreekt van discontinuïteiten over lange periodes en ontwikkeling in stappen [3]. Volgens Chris Evans is het moderne *precision engineering* de derde recursieve fase in de evolutie van precisiefabricage en precisiemachineontwerp [1]. De eerste fase, 'technologische convergentie' genoemd, vond plaats in de 19^e eeuw. Hierin pasten de machinebouwers technologische ontwikkelingen en nieuwe ideeën als generieke bouwblokken, vanuit het ene domein bijna direct toe in het andere. Voorbeelden zijn spindelaandrijvingen, lagers en geleidingen. Daarop volgde de fase 'verticale desintegratie', waarin juist specialistische industrietakken ontstonden met verminderde communicatie en uitwisseling van ideeën tot gevolg, en waarin juist specifieke kenmerken werden benadrukt en basisprincipes vervaagden of verdwenen.

In de nieuwe fase ‘*precision engineering*’, die begon iets na het midden van vorige eeuw, wordt opnieuw technologische convergentie benadrukt met een sterke focus op centrale basisprincipes en basisbouwblokken.

Herhalingsnauwkeurigheid en reproduceerbaarheid

Vandaag de dag zijn vooral herhalingsnauwkeurigheid¹ en reproduceerbaarheid² essentieel om te komen tot gevraagde machineprestaties [4]. Het doel is voorspelbaar dynamisch en thermisch gedrag te bereiken onder veranderende en gedeeltelijk onbekende belastingen, die inwerken op (sub)systemen van precisiemachines en instrumenten. Precisiemetrologie is noodzakelijk, maar niet voldoende. Door nauwkeurig te meten, weet ik wat ik heb, maar weet ik nog niet hoe het anders zou moeten als de uitkomst niet bevredigend is [5]. En ondanks mogelijkheden van de moderne regeltechniek, die de afgelopen decennia weliswaar evolutionair maar significant is verbeterd, maar nog altijd in ontwikkeling is [6, 7], heerst onder *precision engineers* wereldwijd het inzicht dat goede mechanica het uitgangspunt vormt voor het bereiken van goede machineprestaties, samengevat in zogenaamde ontwerpprincipes [4, 8, 9, 10, 11], primair bedoeld om goed om te kunnen gaan met onzekerheid en variatie van belastingen. Voortbordurend hierop, onderscheid ik de volgende precisieontwerpprincipes:

1	Minimaliseren van offset	Toepassen van het Abbe- en Bryan-principe in meettechniek en hiermee verwant, het minimaliseren van de offset van aandrijvingen ten opzichte van het massamiddelpunt.
2	Kinematisch ontwerp	Toepassen van een kinematisch en semi-kinematisch ontwerp.
3	Symmetrie	Toepassen van symmetrie in ontwerp en belastingen.
4	Interne lussen	Toepassen van krachtlussen met hoge stijfheid en thermische lussen met hoge stabiliteit.
5	Isolatie van verstoringen	Toepassen van isolatie door middel van geïsoleerde metrologieframes en thermische isolatie.
6	Belastingcompensatie	Toepassen van gewichtcompensatie, reactiekrachtcompensatie en (parasitaire) stijfheidscompensatie, hoog-bandbreedte regeling met terugkoppeling en passieve demping.
7	Minimaliseren van hysteresis	Minimaliseren van wrijving en hysteresis in hoog-nauwkeurige constructies, verbindingen en geleidingen.
8	Minimaliseren van complexiteit en kosten	Balanceren en daarmee minimaliseren van complexiteit en gerelateerde kosten via een multidisciplinaire systeembenadering.

Tabel 1

Precisieontwerpprincipes ten behoeve van herhalingsnauwkeurigheid en reproduceerbaarheid in de aanwezigheid van veranderende en gedeeltelijk onbekende mechanische en thermische belastingen.

¹ Herhalingsnauwkeurigheid is de mate van overeenkomst van resultaten van achtereenvolgende operaties uitgevoerd onder dezelfde condities [4].

² Reproduceerbaarheid is de mate van overeenkomst van resultaten van operaties uitgevoerd onder verschillende condities.

Ik heb de vrijheid genomen het principe ‘minimaliseren van complexiteit en kosten’ toe te voegen. Dit vraagt om een objectieve benadering in het balanceren van multidisciplinaire deelsystemen op een hoger abstractieniveau, precies waar het bij Mechatronica om draait. Hoewel het toevoegen van demping in de op-hanging van actuatoren van *wafer chucks* door het risico van laagfrequente hysteresis tot meer complexiteit leidt, wordt het mechanisch- en regelbaar-ontwerp hiermee aanmerkelijk vereenvoudigd. Onderzoek naar diverse dempingsprincipes bij ASML, in samenwerking met industriële en academische partners, heeft geleid tot succesvolle toepassing en verbetering van positioneer-prestaties van diverse generaties *wafer scanners* (XT, NXT en NXE).

Jim Bryan verkondigt ‘determinisme’ als “een gezonde basis voor ontwerp, realisatie en performancetesten. Het basisidee is dat resultaten van automatische meet- en bewerkingsmachines perfect herhaalbaar zijn als sterren aan de horizon.” Hier refereert hij aan John Loxham en geeft hij aan dat er slechts een zevental uitzonderingen zijn op de deterministische aard van de klassieke fysische wetten [12]. “Deze uitzonderingen hebben betrekking op massa’s van moleculaire en atomaire schaal, welke geen praktisch belang hebben binnen ‘manufacturing’. Elk effect heeft een oorzaak, wat binnen onze mogelijkheden ligt om te begrijpen en te corrigeren. Er is niets random of probabilistisch in het gedrag. Alles gebeurt met reden en de lijst van redenen is klein genoeg om beheersbaar te zijn door gezond verstand, goede metrologie en redelijke investeringen.” Hoewel ik het absoluut eens ben met zijn basisgedachte, zie ik bovenstaande filosofie van Bryan vandaag de dag enigszins mank gaan. Voor volgende generatie EUV-systemen met verhoogde numerieke apertuur (NA) blijkt niet primair mechatronica in klassieke zin bepalend voor de machine-architectuur, maar vooral de stochastiek van bewegende deeltjes in een moleculaire flow op de interface van verschillende vacuüm regimes, in hoofdzaak bepaald door random gedrag van moleculaire deeltjes.

Mechatronica

Er zijn veel definities van ‘mechatronica’ en het vakgebied is tegenwoordig wijdverbreid. We zien de term echter pas voor het eerst officieel geplaatst als handelsmerk in Japan in 1969 (goedgekeurd in 1972) door Yaskawa Electric Corporation. Met mechatronica werd toen bedoeld: het ‘samensmelten van mechanische en elektrische technologie’, ofwel het ‘elektrificeren van mechanismen’. Het doel was vooral het optimaliseren van productie, zoals bijvoorbeeld het toepassen van automatische lasrobots in de auto-industrie en het toepassen van piezo-elektrische actuatoren in bewerkingsmachines om positioneerfouten van schroefspindel-aandrijvingen te corrigeren. Productontwerp was slechts een

middel hiertoe, geen doel op zich [13]. Pas in 1996 kreeg ‘mechatronica’ legitimiteit in academische kringen met de publicatie van het eerste gerefereerde journal ‘*IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*’, met als definitie voor het vakgebied: ‘De synergetische integratie van mechanische technologie met elektronische en intelligente computer-aansturing in het ontwerp en fabricage van industriële producten en processen.’ [14]. Ondanks overlap van activiteiten, waren verschillen per regio (continent) duidelijk zichtbaar. Mechatronische R&D in de Verenigde Staten en grote delen van Europa concentreerde zich vooral op de productie-industrie. In Azië, met name in Japan, ontstond een duidelijke mix van mechatronische toepassingen in zowel de productie-industrie als in de product-ontwikkeling.

Vanuit Nederland heeft de productgerelateerde focus vooral zijn opmars gekend in de jaren 1980 met de ontwikkeling van producten voor de consumentenelektronica en de halfgeleiderindustrie, vooral binnen Philips en latere spin-offs, zoals FEI en ASML. Het zijn juist de optische, in eerste instantie contactloze processen³ met hoge nauwkeurigheid, waarvoor de voorkeur ontstond deze processen mechanische te ‘isoleren’ van de buitenwereld. Het concept van een geïsoleerde machine-architectuur met nagenoeg ‘nul’ stijfheid naar de omgeving en een hoge actieve ‘virtuele’ stijfheid op basis van kracht-actuatoren en een hoge regelbandbreedte naar een intern metrologie-frame, maakte dit mogelijk.



Figuur 2

Geografisch verschillende doelstellingen voor invoering van Mechatronica.
 Verenigde Staten en grote delen van Europa: Optimaliseren van productie-industrie,
 Nederland: Optimaliseren van de ontwikkeling van producten (rechts),
 Japan: Mix van beide.

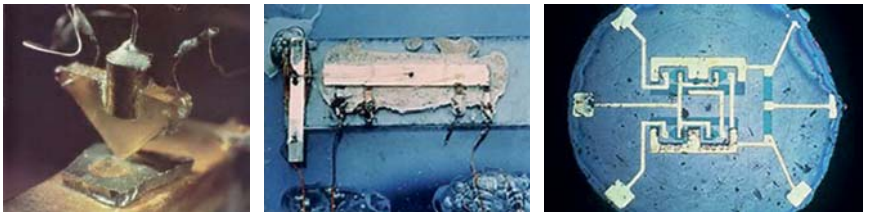
³ Latere immersie lithografie-systemen gaven opnieuw een relatief grote interactie tussen de deelsystemen *wafer stage* en projectie-optiek.

IC-lithografie

“If you have everything under control, you’re not moving fast enough.” – Mario Andretti.

Halfgeleider fabricage

In 1947 werd de ‘punt contact transistor’ uitgevonden door John Bardeen en Walter Brattain, met germanium als halfgeleidend materiaal. William Shockley kwam een jaar later met een alternatief op basis van een bipolaire junctie. Dit vormde een belangrijke basis voor de uitvinding van de geïntegreerde schakeling in 1958 bij Texas Instruments. Jack Kilby bedacht een eerste variant op een germanium basis-laag. Robert Noyce introduceerde later een planair productieproces op basis van een laag zuiver kristallijn silicium, waar op lithografische wijze componenten op werden aangebracht. Dit vormde de basis voor de fabricage van functionele lagen in een geïntegreerd circuit (IC), die tot op de dag van vandaag wordt gebruikt.

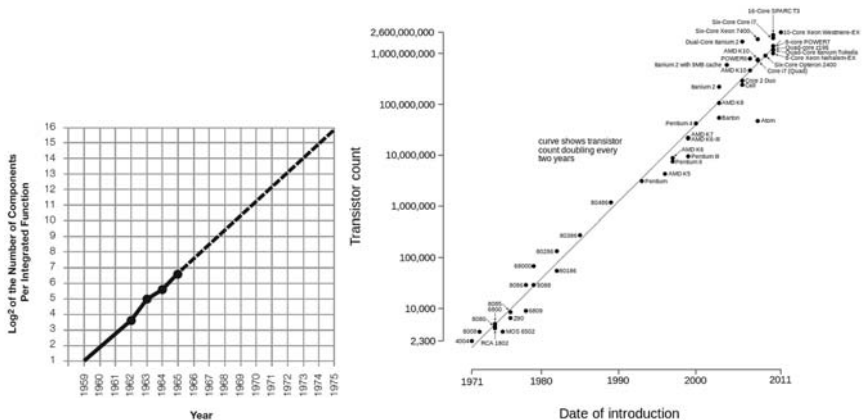


Figuur 3

De eerste punt contact transistor uit 1947 door John Bardeen en Walter Brattain, Bell Labs (links), de eerste geïntegreerde schakeling (IC) uit 1958 door Jack Kilby, Texas Instruments (midden) en het eerste experimentele planaire IC uit 1960 door Robert Noyce, Fairchild Semiconductor (rechts).

Gordon Moore, naast Robert Noyce oprichter van Intel (1968), voorzag dat het economische voordeel van gereduceerde kosten, door toepassing van geïntegreerde elektronica op een halfgeleider substraat, door zou blijven schalen met verdergaande technologische ontwikkeling [15]. In 1965 voorspelde hij op basis van een paar datapunten dat het aantal transistoren per oppervlakte-eenheid in een IC iedere 12 maanden zou verdubbelen bij een gelijkblijvend prijsniveau (zie Figuur 4) – deze trend werd later bijgesteld naar een verdubbeling van iedere 18-24 maanden. Dit verschijnsel van toenemende functionaliteit per oppervlak-

eenheid, noemen we ‘krimp’, en het is de belangrijkste knop als het gaat om de beïnvloeding van kosten per functie van geïntegreerde circuits. Krimp betekent meer doen met minder. De mobiele telefoon die u vandaag bij u heeft, heeft vergeleken met de eerste supercomputer, de Cray 1 uit 1976, ruwweg 16.000 keer meer geheugen, is 40.000 keer lichter en 10.000 keer goedkoper. Ontwikkelingen in de halfgeleiderindustrie, in het bijzonder in de lithografie, hebben een belangrijke rol gespeeld in de revolutionaire toename van rekenkracht en dataopslag over de afgelopen decennia. Naast de thuiscomputer, de tablet en de smartphone, maken datacenters voor verwerking van grote hoeveelheden data de volgende revolutionaire stap door en het ligt in de lijn der verwachting dat het hierna niet stopt. De voorspelling is dat ‘datavisualisatie’ de volgende revolutionaire stap is om de enorme hoeveelheden data gemakkelijk toegankelijk te maken [16].



Figuur 4

Grafische representaties van Moore's Law: aantal componenten per IC geëxtrapolerd op basis van een waargenomen trend tussen 1959 en 1965 [15] (links) en het aantal transistoren per microprocessor chip tussen 1971 en 2011 (rechts).

Lagere resolutie – Krimp

De mate van krimp bij de fabricage van IC's wordt bepaald door de kleinste patronen die afgebeeld kunnen worden in *resist* op een *wafer*, ofwel de resolutie van het lithografisch proces. Resolutie wordt primair beïnvloed door twee factoren:

1. De kleinste afbeelding die op de *wafer* kan worden geprojecteerd door het optisch systeem, volgens het Rayleigh-criterium $R \propto \lambda/NA$, bepaald door de verhouding van de golflengte van het gebruikte licht (λ) en de numerieke apertuur van de projectie-optiek (NA).
2. Het oplossend vermogen van de foto-resist, bepaald door procescondities.

Over de afgelopen vijftig jaar is door het toepassen van een kleinere golflengte licht⁴ en het vergroten van de NA de resolutie met meer dan een factor 30 gereduceerd. Omdat de introductie van EUV-lithografie voor volumeproductie in de tijd naar achter is geschoven, zijn tussentijds alternatieven bedacht om de resolutie van 193 nm lithografie verder te verkleinen. Eerst met de introductie van 193 nm immersie lithografie (2006) met een uiteindelijke resolutie van 38 nm, gevolgd door het toepassen van meervoudig patroneren als *double exposure* en (*spacer*) *double patterning* door middel van *litho-etch-litho-etch* technologie.

U vraagt zich misschien af waar EUV-lithografie nu staat en wanneer het gebruikt gaat worden voor massafabricage. De eerder getrokken analogie van EUV-lithografie met de Concorde⁵ [17] als zijnde een economisch onaantrekkelijk alternatief, in dit geval voor de huidige 193 nm immersie lithografie, lijkt allerminst actueel [18]. Het grote verschil tussen luchtvaart en lithografie, afgezien van het twaalfvoudige aantal ‘verdubbelingen’ van de meest kritische parameter over de afgelopen vijftig jaar (een factor 3 in kruissnelheid versus een factor 36 in het aantal transistoren per IC), is het verschil in kosten per functie. Waar de Concorde meer dan een orde duurder was dan alternatieve ‘*wide body*’-vliegtuigen, als de Boeing 747, is het (vooral nog) geprognosticeerde verschil in kosten per laag, voor EUV-lithografie een factor twee tot drie lager. EUV-lithografie was in eerste instantie bedoeld voor massafabricage van de 90 nm node in 2004, wat inmiddels is bijgesteld naar 5 nm in 2020. Recentelijke ontwikkelingen op het gebied van zowel vermogen als betrouwbaarheid van de bron dragen echter bij aan een toenemend vertrouwen van klanten, getuige de recentelijk aanschaf van EUV-lithografie systemen voor serie productie door TSMC en Intel [19, 20].

Lagere kosten van eigenaarschap

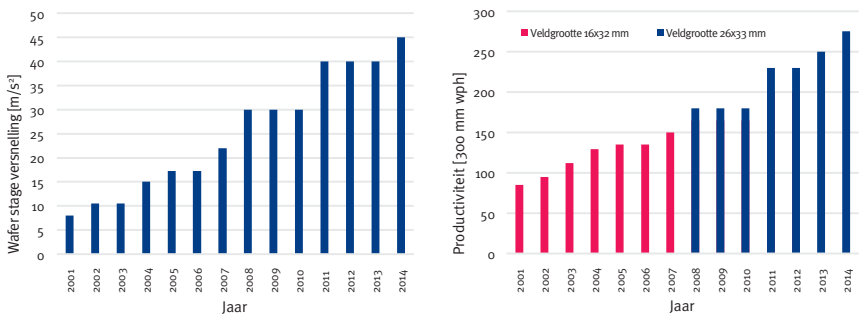
Om de kostentoeename van optische lithografiesystemen te beperken, is eind jaren negentig de *wafer stepper* vervangen door een *wafer scanner*. Voor een scannend systeem waren zowel de afmetingen als ook de eisen aan optische aberraties van de projectieoptiek minder groot, waardoor de kostentoeename beperkt bleef voor grotere geprojecteerde velden op de *wafer*. Een scannend systeem impliceerde echter wel een synchrone (tegengestelde) beweging van masker (reticle) en *wafer*

⁴ Evolutie van gebruikte golflengtes voor lithografie over de afgelopen 25 jaar: 365 nm (i-line), 248 nm (KrF), 193 nm (ArF) en 13.5 nm (EUV).

⁵ De Concorde Supersonic Transport (1969-2003) vloog in minder dan drie uur van London naar New York, echter met een ruim tien keer hoger prijskaartje, waardoor het supersonische tijdperk voor de burgerluchtvaart in economisch opzicht niet houdbaar bleek.

ten opzichte van elkaar, met een toelaatbare variatie in de orde van een fractie van een nanoseconde.

Daarnaast hebben betere machineprestaties geleid tot lagere kosten van eigenaarschap (*cost of ownership*) als gevolg van productiviteitsverhoging. Hogere snelheden, versnellingen (zie Figuur 5) en gebruik van een efficiënter machine-concept met minder ‘*overhead*’-tijd op basis van twee *wafer stages* (TWINSCAN) en de introductie van planaire motoren, hebben ruwweg geleid tot een verdrievoudiging van de productiviteit over de afgelopen 15 jaar.

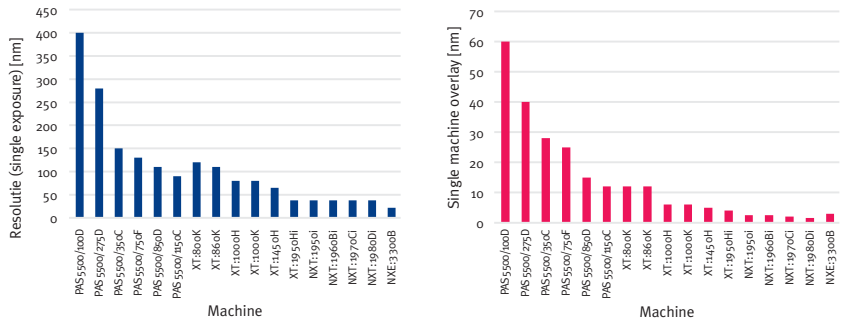


Figuur 5

Wafer stage-versnelling (links) en machine-productiviteit in 300 mm wafers per uur voor een tweetal veldgroottes (16x32 mm en 26x33 mm) vanaf 2001 (rechts).

Hogere plaatsingsnauwkeurigheid

Om kleinere transistoren, lijnen en contactgaten te kunnen maken, is een evenredige verbetering in *overlay*-prestatie nodig. Concreet betekent dat: een verbeterde plaatsingsnauwkeurigheid van dergelijke features ten opzichte van de voorgaande laag. In Figuur 6 zijn de resolutie (*single exposure*) en *single machine overlay* (SMO) weergegeven voor diverse types machines vanaf begin jaren 1990: de PAS 5500 (1991), de TWINSCAN XT (2004), NXT (2009) en NXE (2013). Na introductie, steeds gekoppeld aan een nieuwe golflengte, respectievelijk 365 nm (i-line), 248 nm (KrF), 193 nm (ArF, later gecombineerd met immersie technologie) en 13.5 nm (EUV), zijn machines verder geëvolueerd waardoor zowel de resolutie en *overlay*-prestatie significant zijn afgenomen, ruwweg met een orde per decennium. Interessant hierbij is dat over die periode het aantal significante bijdragen aan het *overlay*-budget is verdrievoudigd en dat de grootste bijdrage aan *overlay* vandaag kleiner is geworden dan de kleinste significante bijdrage tien jaar geleden. Het wordt dus steeds lastiger om verdere verbetering in *overlay*, en daarmee in krimp, te bereiken. Niet alleen neemt het aantal significante bijdragen sterk toe, ook zien we steeds meer interacties en afhankelijkheden. Effecten zijn niet langer orthogonaal.



Figuur 6

Resolutie voor single exposure (links) en single machine overlay (SMO) prestatie (rechts) per machine-type (jaar van introductie): PAS 5500 (1991), TWINSCAN XT (2004), TWINSCAN NXT (2009) en TWINSCAN NXE (2013).

Mechatronica 2.0

“We need to shift the paradigm from reactive technologies to more integrative solutions that deal with the variety and complexity of the threats that are out there today.” – John W. Thompson.

Complexiteit op componentniveau

Door de toegenomen complexiteit op een lager abstractieniveau is er steeds meer behoefte aan oplossingen op het grensvlak van meerdere disciplines. Zo maakt het vernieuwde concept druppelgenerator voor de EUV-bron een vijf- tot tienvoudige snelheid van tindruppels mogelijk (250-500 m/s) ten opzichte van het huidige systeem, met daarbij ook een hogere betrouwbaarheid. Dit primair door intensieve samenwerking en een multidisciplinaire aanpak van architecten en specialisten op het grensvlak van stromingsleer, fysica en werktuigbouwkunde.

Analoog aan de eerder ontstane vakgebieden ‘Optomechanica’ en ‘Electromechanica’ vormde zich vanaf begin jaren 1970, uit de synergetische combinatie van precisiemechanische technologie en elektronische aansturing, het ‘tweeledige’ vakgebied ‘Mechatronica’. Vanwege steeds strengere eisen aan de prestatie van componenten en subsystemen, zien we echter de laatste jaren meer behoefte aan verdergaande integratie van meerdere aangrenzende vakgebieden als fysica, optica, warmte- en stromingsleer, materiaalkunde, mathematica en software, en daarmee meer complexiteit op componentniveau. De benodigde synergetische, maar nu ‘meerledig’ integrale aanpak, noem ik ‘Mechatronica 2.0’.

Bij ASML zijn de afgelopen jaren in de research-afdeling een aantal multidisciplinaire componenten en concepten onderzocht, die ik graag kort met u wil door nemen. Genoemde technologieën worden reeds toegepast of worden onderzocht voor toekomstige generaties *wafer scanners*. Ondanks dat we uit het oogpunt van kosten- en risicobeheersing zoveel mogelijk hebben getracht machineprestaties te verbeteren door evolutionair door te ontwikkelen op basis van bestaande technologie, bleek een meer ‘revolutionaire’ stap in deze noodzakelijk.

Reluctantie actuator

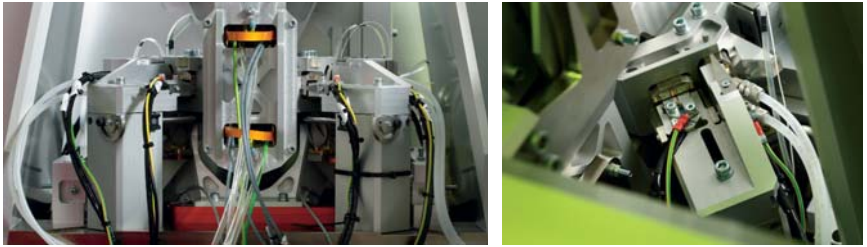
Vanuit Newton's derde wetmatigheid 'kracht is gelijk aan massa maal versnelling' blijkt wanneer de gevraagde acceleratie significant wordt ten opzichte van de krachtdichtheid er onevenredig veel actuator massa en stroom nodig zijn voor het versnellen van de betreffende massa. Dit leidt tot mechanisch resonanties en uiteindelijk tot ontoelaatbare temperaturen in de spoel van de actuator, waardoor de versnelling en daarmee de productiviteit van de machine gelimiteerd zijn.

Het fysisch verschil in krachtdichtheid tussen huidige Lorentz-actuatoren en nieuwe reluctantie-actuatoren ligt in het feit dat in de reluctantie-actuator de magnetische flux in hoofdzaak door ijzer wordt geleid, waardoor de magnetische weerstand kleiner is en met minder massa en stroom meer kracht gemaakt kan worden en minder warmte wordt gedissipeerd. Het intrinsieke nadeel, echter, ligt in de niet-lineaire (kwadratische) afhankelijkheid van de kracht van stroom en afstand en de aanwezigheid van saturatie en hysteresis. Uit onderzoek bleek dat wanneer in plaats van 'stroom' en 'afstand', de 'magnetische flux' in de actuator wordt geregeld, de niet-lineariteiten verdwijnen en de motor zich gedraagt als een ideale kracht-actuator, zelfs met vergelijkbare of geringere positie- en oriëntatie-afhankelijkheid dan traditionele Lorentz-actuatoren.

Na eerste experimentele verificaties met functionele demonstrators zijn diverse prototypes gerealiseerd van de actuator en bijbehorende versterker en flux-meet-elektronica. Ook is een actuator test-rig gebouwd met een dynamisch bereik van 10^5 om de actuator bij realistische kracht setpoints (tot 1 kN) in 6 vrijheidsgraden te kunnen testen, inclusief benodigde kalibratie strategieën. Door het behalen van de gewenste nauwkeurigheid, is de actuator intussen overgedragen aan het ontwikkelprogramma voor toepassing in volgende generatie EUV-systemen met verhoogde NA (>0.5) als *key-enabler*. Dit is mogelijk gemaakt door meerjarig, integraal en multidisciplinair onderzoek aan een mechatronisch subsysteem, met het accent op elektromagnetische modelvorming, het meten en regelen van magnetische flux, actuator linearisatie en kalibratie via geavanceerde regeltechniek en koeling in 3D-geprinte structuren.

Over-actuatie en over-sensing

Het toepassen van meer actuatoren dan *rigid-body* vrijheidsgraden lijkt statische over-bepaaldheid te veroorzaken, wat leidt tot ongedefinieerde krachten en vervormingen. Theoretisch is dat ook zo, beredeneerd vanuit residuele stijfheden in de actuatoren als gevolg van plaatsafhankelijk gedrag. Op *engineering* niveau, echter, zijn deze stijfheden, mits netjes ontworpen, verwaarloosbaar klein. In



Figuur 7

Actuator test rig voor performance karakterisatie van reluctantie (en Lorentz) actuatoren in 6 vrijheidsgraden met een dynamisch bereik van 10^5 .

tegenstelling tot het klassiek, statisch bepaald vastleggen van vrijheidsgraden met behulp van passieve elementen, die stijf zijn in de axiale richting en elastisch in dwarsrichting (zogenaamde sprietten), leidt het toepassen van meerder actieve stijfheden in de praktijk niet of nauwelijks tot over-bepaaldheid. Actuatoren schrijven immers kracht voor, geen positie, en stijfheid wordt ontleend aan de positie-meting ten opzichte van een geïsoleerd metrologie frame en een teruggekoppelde regel-lus.

Traditioneel werden *wafer-* en *reticle chucks* voorzien van evenveel actuatoren als *rigid-body* vrijheidsgraden. Dit was om het potentieel probleem van *chuck*-vervorming, ten gevolge van ongekende actuatorkrachten door variaties in de actuator-constante en stroom te voorkomen. Het intrinsieke nadeel was echter, dat een kleine offset van horizontale aandrijfkraften ten opzichte van het massamiddelpunt leidde tot excitatie van rotatievrijheidsgraden van het *chuck* om beide horizontale assen. Onderzoek naar over-actuatie aan een experimentele proefopstelling en naar actuator- en sensorplaatsing, heeft echter aangetoond dat door het toepassen van een vierde verticale actuator de excitatie van zowel *rigid-body* rotaties als *non-rigid-body* resonanties kan worden voorkomen. Dit laatste maakt verhoging van de regelbandbreedte mogelijk, met een verbeterde laagfrequente storingsonderdrukking en lagere positiefout tot gevolg.

Naast over-actuatie is ook over-sensing uitgebreid onderzocht. Door het toevoegen van meer sensoren of sensor-assen dan *rigid-body* vrijheidsgraden, kan de interne vervorming in het *chuck* beter worden meegenomen en de positioneerprestatie worden verbeterd. Mede op basis van bovengenoemd onderzoek en met betrokkenheid van regeltechnici, dynamici, precisiemechanen en specialisten in geometrische meettechniek, zijn zowel over-actuatie als over-sensing intussen toegepast in meerdere typen ASML-*wafer scanners*.

Thermo-mechanische compensatie

Als gevolg van de thermische belasting door de belichting van de *wafer*, treedt thermo-mechanische vervorming op ter grootte van nanometers, wat groter is dan de totale toelaatbare overlay-fout tussen twee proceslagen. Bij EUV-lithografie is dit effect groter dan bij immersie-lithografie door de afwezigheid van water en relatief veel *out-of-band* licht. En dit effect wordt in de toekomst nog groter door het gebruik van een foto-*resist* met een lagere gevoeligheid ($>40 \text{ mJ/cm}^2$).

Ondanks de geringe dikte van de *wafer* ($<1 \text{ mm}$) ten opzichte van de *wafer*-tafel waarop deze wordt vastgeklemd, en ondanks de keuze van een stijf keramisch materiaal voor de tafel, kan de vervorming van de *wafer* maar voor een deel worden onderdrukt. Doordat de tijdsconstante voor warmteafvoer naar het koelwater in de *wafer*-tafel groot is ten opzicht van de belichtingstijd, is de vervorming van de *wafer* niet uniform en erg lokaal. En daardoor niet te compenseren door eenvoudigweg de vergrotingsfactor van de lens bij te stellen.

Door de reproduceerbaarheid van de oplegging van de *wafer* op een zogenaamd pukkelpatroon en door de voorkennis van de temporele en spatiele verdeling van de hoeveelheid warmte die tijdens de belichting op de *wafer* wordt aangebracht, is de vervorming met een transient thermo-mechanisch model echter te voorspellen en te compenseren door voorwaardskoppeling in het *wafer stage* positie *setpoint*. Gebruik van lokale temperatuur sensoren is niet nodig, wel een (geavanceerde) kalibratie van betreffende parameters van de *wafer*-tafel en de belichting. Deze multi-fysische compensatie toont goede voorspelbaarheid en is intussen overgedragen aan de ontwikkelingsafdelingen van DUV- en EUV-systemen.

Research en innovatie

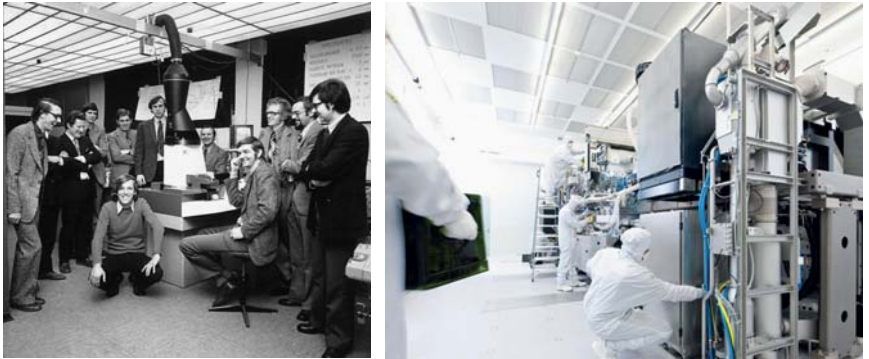
“Innovation has nothing to do with how many R&D dollars you have. When Apple came up with the Mac, IBM was spending at least 100 times more on R&D. It’s not about money. It’s about the people you have, how you’re led, and how much you get it.” – Steve Jobs.

Van research laboratorium naar ecosysteem

Ten tijde van de grote research laboratoria, als het Philips Natuurkundig Laboratorium (NatLab, 1914), AT&T Bell Laboratories (Bell Labs, 1925) en Sandia National Laboratories (1948), was het nog heel gebruikelijk dat grote uitvindingen in vele tientallen jaren werden uitgewerkt, al dan niet opgevolgd door innovatie⁶ in de vorm van productontwikkeling en marktintroductie. Tegenwoordig is de innovatietijd sterk teruggelopen en gebeurt innovatie niet meer in isolement, maar in een ecosysteem van klanten, technologie-partners, toeleveranciers en academia, gedreven door een markt van klanten. ‘*Technologie push*’ heeft gedeeltelijk plaatsgemaakt voor ‘*market pull*’, en dat is niet veel anders in de halfgeleider-industrie, mede als gevolg van de korte terugverdientijd van typisch drie tot vijf jaar (EUV-lithografie vormt hierop vooralsnog een uitzondering). Ondanks het hoog-innovatieve karakter, is het aantal technologische doorbraken dat versneld (in orde-grootte een jaar) tot productontwikkeling leidt, beperkt tot die gevallen waar een duidelijke klantvraag aan gekoppeld is, zoals een *pellicle* voor contaminatie-beheersing in EUV-lithografie. En dit heeft alles te maken met complexiteit.

Waar dertig jaar geleden een team van ongeveer 10 ontwikkelaars voldoende was om een eerste prototype *wafer stepper* neer te zetten, hebben we nu teams nodig van orde-grootte 1000 ontwikkelaars per machine-type en een netwerk van vele specifieke toeleveranciers. Vanwege de huidige omvang is het belangrijk, zo niet essentieel, om technologische risico’s zoveel mogelijk voorafgaand aan ontwikkeltrajecten te adresseren. Research en voorontwikkeling werd in het verleden vanuit ASML vooral door externe partners ingevuld, waaronder Philips Research. Nu ligt naast de regie ook de uitvoering voor een belangrijk deel intern en is samenwerking met partners onverminderd belangrijk.

⁶ Research behelst het omzetten van geld in ideeën; innovatie het omzetten ideeën in geld [21].



Figuur 8

Projectgroep SiRe1 (silicon repeater) bij de eerste prototype wafer stepper bedacht op het Philips NatLab in 1971 door Herman van Heek, Gijs Bouwhuis en Ad Bouwer (links), en moderne EUV wafer scanner ontwikkeld door ordegrootte 1000 ontwikkelaars en een netwerk van vele specifieke toeleveranciers (rechts).

Het op tijd terugdringen van risico's was een aantal decennia geleden belangrijk en nu essentieel, en wel vanuit de toegenomen complexiteit en de snelheid van innovatie. Jos Benschop onderstreepte onlangs, naast het belang van focus op multidisciplinariteit, het belang van focus op innovatie bij industriële research. Uiteindelijk gaat het niet om het genereren van slimme ideeën alleen, maar om het genereren van ideeën die tot innovatie (kunnen) leiden [21]. De hamvraag is evenwel hoe de onderzoekslijnen voor research en voorontwikkeling gedefinieerd en geëvalueerd zouden moeten worden. En de belangrijkste uitdaging blijft het op tijd terugdringen van technologische risico's om daarmee een goede overdracht naar ontwikkelafdelingen en ontwikkelprogramma's te kunnen borgen. Juist vanwege de lange doorlooptijd en de relatief grote onzekerheid tijdens het onderzoekstraject, loert de verleiding om 'research' te beschouwen als 'leuk-om-te-hebben' met 'slechts' een inspanningsverplichting. Als het eerste experimentele bewijs van een concept geleverd is in een demonstrator en de technologie als interessant is aangemerkt, zou mijns inziens een gezamenlijke, meer systematische inspanning moeten volgen vanuit research dan wel (voor)ontwikkeling in nauwe samenwerking met roadmap-eigenaren, om de technologie uit te werken en technologische risico's te elimineren tot engineering-niveau.

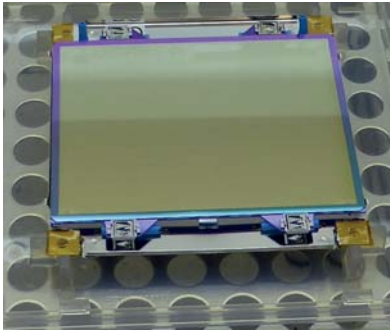
Creativiteit in ontwerp en onderzoek

Modelvorming en analyse zijn essentieel voor het verkrijgen van afschattingen van fysisch inzicht en gedrag en daarmee ter voorkoming van realisatie van dure en inadequate ontwerpen. De ingenieur en wetenschapper moeten, naast

nauwkeurige analyses, ook snelle nulde-orde-afschattingen te kunnen maken voor een eerste gevoel en begrip van afhankelijkheden en gevoeligheden. Daarnaast zijn experimentele analyse en validatie essentieel, bij voorkeur getrapd. Via zogenaamde hardware-*demonstrators* kan op relatief eenvoudige wijze een orde-grootte worden bepaald of een eerste verificatie (*proof of concept*) worden verkregen. Deze *demonstrators* worden bij voorkeur opgevolgd door functionele modellen, om een goede benadering van de uiteindelijke performance te verkrijgen, echter, op zichzelf staand en zonder dat onderzoekers zich hoeven te bekommeren om alle details. Een derde verificatie volgt veelal in de vorm van een (pre)prototype, een subsysteem dat in een machine-omgeving getest kan worden als voorloper van een systeem dat naar klanten verscheept wordt.

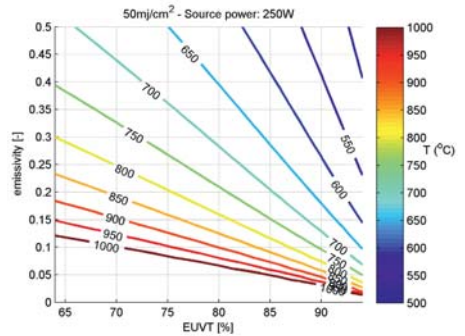
In mijn ogen wordt het belang van menselijke creativiteit bij precisieontwerp onderschat. Te vaak wordt teruggegrepen op reeds bestaande oplossingen, (enigszins) verbeterd door ‘lokale’ optimalisatie. De soms ogenschijnlijk langere doorlooptijd wordt gezien als belangrijkste reden om maar zo weinig mogelijk te veranderen en pleisters te plakken op gevonden artefacten. Hier ligt een delicate balans tussen voldoende afstand durven nemen om los te komen van geëigende paden en niet het wiel opnieuw uit te vinden. “Zelden”, zo stelt Wim van der Hoek in zijn afscheidsrede, “is door het gemis aan literatuurstudie”, waar hij in onderzoek met afstudeerders geen gebruik van maakte, “een erkende constructieve oplossing over het hoofd gezien, maar relatief vaak kwamen we door het negeren van de traditionele benadering tot verrassend nieuwe oplossingen.” Vloekend met alle wetenschappelijke standing en traditie was voor Wim literatuuronderzoek in de brainstormfase en bij de eerste opzet van het ontwerp taboe [22]. Hoewel ik deze opvatting herken en deel als het gaat om constructief scheppend bezig zijn, primair om de creativiteit niet vroegtijdig in te perken, heb ik ook positieve ervaring met het traceren en creatief toepassen van bestaande technologieën in nieuwe applicatievelden.

Als een van de uitdagingen naar verbetering van ‘systeemdenken’ noemt ook Ton Peijnenburg recentelijk: “Een betere balans tussen de creatieve, meer ‘disruptieve’ aanpak enerzijds en de analytische, meer ‘incrementele’ aanpak anderzijds, waardoor minder vaak een snelle, onbewuste convergentie zal ontstaan naar één enkele oplossing” [23]. Hier kan inbedding van een goede research- en voorontwikkelingsorganisatie een verschil maken en helpen bij het creëren van doorbraken op een kostenefficiënte manier.



Figuur 9

Poly-silicium pellicle met een dikte van 50 nm ter bescherming van EUV-maskers (6x6") tegen kleine deeltjes (links), en pellicle temperatuur als functie van EUV-transmissie (EUVT) en emissiviteit (rechts).



Een recent voorbeeld hiervan binnen ASML is het vinden van een ‘doorbraak’ in het significant verhogen van de emissiviteit van een 50 nm poly-silicium *pellicle*, toegepast ter bescherming van maskers tegen kleine (μm) deeltjes in EUV-*waferscanners*. Een research-activiteit ter grootte van een fractie van de ontwikkelingsspanning bleek voldoende voor het vinden en toetsen van een oplossing bekend in een ander applicatieveld, in dit geval het toepassen van een dunne metaalcoating van een paar nanometer op het silicium membraan. Hierdoor kon de temperatuur van het *pellicle* van meer dan 1000°C worden teruggebracht naar 550°C (zie Figuur 9) en ontstond levensvatbaarheid voor pellicles in de eerste generaties EUV-systemen [24].

Leren van de natuur

Hoewel er een enorme discrepantie lijkt te bestaan tussen door mensen bedachte (artificiële) en door de natuur gecreëerde oplossingen, lijkt het zinvol dat we ons, vanwege steeds uitdagendere specificaties, laten inspireren door de natuur, specifiek om vroeg in het creatieproces andere denkrichtingen te forceren.

Bij gekko's treffen we bijvoorbeeld een van de meest complexe en efficiënte adhesie-mechanismen aan, die zorgt voor een extreme kleefkracht. Gekko's danken deze kleefkracht aan gegroefde structuren aan de onderzijde van hun tenen, hechtlamellen genaamd. Deze lamellen hebben honderdduizenden uitlopers tot $0.2 \mu\text{m}$, die interactie op atomaire schaal mogelijk maken gebaseerd op zogenaamde Van der Waalskrachten, met bovendien een aanpassend vermogen naar de oppervlakteruwigheid van de ondergrond. Deze krachten werken altijd, zonder tussenkomst van hulpstoffen.

Gekko's beschikken ook over een snel en eenvoudig onthechtingsmechanisme dat cruciaal is voor de beweeglijkheid. Hoewel dit relatief complexe mechanisme op basis van simultane afschuif- en afpelbeweging van de gekko intussen dicht bij de natuurlijke biomechanica kunstmatig is nagebootst, zijn ook alternatieve methoden ontwikkeld om de adhesiekracht van synthetische microstructuren 'schakelbaar' te maken, gebruikmakend van externe triggers. Deze, door de natuur geïnspireerde, schakelbare adhesie zien we onder ander in geheugenmaterialen, actieve polymeren, en door toepassing van magnetische velden en mechanisch belasting tot voorbij het knikpunt. Het werkt zowel in atmosferische als in vacuümcondities [25].

Academisch en industrieel onderzoek

“Coming together is a beginning; keeping together is progress; working together is success.” – Henry Ford.

Leren van elkaar

In tegenstelling tot technologie-overdracht, dat begin jaren 1980 volgens Evans werd geassocieerd met de opvatting dat engineers nederig academische experts zouden benaderen om van hen te leren [1], is technologie-uitwisseling tussen academia en industrie als gelijken en langs twee richtingen een veel betere benadering voor het optimaliseren van vooruitgang. Gelukkig is technologie-uitwisseling tegenwoordig in algemene zin gemeengoed, getuige ook het groot aantal gezamenlijke wetenschappelijke publicaties met de industrie. Dit leidde vorig jaar voor deze universiteit voor de zevende keer tot een eerste plaats op de CWTS Leiden Ranking onder 750 universiteiten wereldwijd.

Voor bedrijven met een productportfolio, zoals ASML, is (wetenschappelijk) publiceren niet triviaal en worden bijdragen aan internationale conferenties⁷ in mindere mate gestimuleerd dan vanuit academia en industriële partijen met een business model gebaseerd op het verkopen van kennis. Toch zou ik pleiten, en gelukkig zie ik een positieve lijn hierin, samenhangend met een toenemend aantal gefinancierde promotieplaatsen, om niet voornamelijk te investeren ten behoeve van aanwinst in menselijk kapitaal, maar meer ook ten behoeve van interactie en uitwisseling van kennis over en weer. Vooral omdat de eerder genoemde grote research laboratoria vandaag de dag niet meer bestaan.

Samenwerking met de industrie, wat typisch is ingebed in het DNA van technische universiteiten, heeft historisch geleid tot een sterke band tussen de TU Eindhoven en de industrie in de Brainport regio en daarbuiten. Deze wordt de laatste jaren verder aangesterkt door een toenemend aantal aanstellingen van deeltijdhoogleraren vanuit de industrie. Omgekeerd zou ook een (deeltijd-)sabbatical voor

⁷ Voorbeelden van organisaties op het gebied van precision engineering en nanotechnologie: DSPE (Dutch society for precision engineering), euspen (European society for precision engineering and nanotechnology), ASPE (American society for precision engineering) en CIRP (Collège international pour la recherche en productique / The international academy for production engineering).

universitaire (hoofd)docenten en hoogleraren in het bedrijfsleven een positief effect kunnen sorteren op de begripvorming en interactie met de applicatiekant en de multidisciplinariteit van het academisch onderzoek.

High Tech Systems Center (HTSC) – Multidisciplinair samenwerken

Traditioneel heerst bij hoogleraren het gevoel dat het doorbrengen van uren van promovendi buiten de eigen laboratoria minder rendement sorteert in termen van wetenschappelijke output in het eigen vakgebied. Dit gevoel vertaalt zich in de praktijk in een ‘archipel van eilandjes’ binnen de universiteit, zoals ook Maarten Steinbuch constateerde bij zijn inauguratie in 2003 [6] en wat tot op de dag van vandaag niet wezenlijk is veranderd. Verandering vraagt waarschijnlijk een aanpassing in de *target setting* voor de wetenschappelijke staf binnen individuele faculteiten van de universiteit.

Mijn stelling is dat multidisciplinaire samenwerking tussen ingenieurs in de industrie als goed voorbeeld kan dienen voor samenwerking tussen promovendi in de academische wereld, zonder dat dit ten koste gaat van de diepgang van het onderzoek. Sterker nog, het biedt voordelen. In plaats van een black box -beschouwing van een cryostaat bij onderzoek naar elektromagnetische aspecten in supergeleidende motoren, wordt de realiteitszin en daarmee een eventuele industriële toepasbaarheid, vergroot door parallel in te zoomen op relevante details uit andere disciplines, zoals het thermo-mechanisch ontwerp van de ophanging en de isolatie van de dynamisch belaste supergeleidende spoel in de cryostaat. En dat bereik je niet door een paar keer per jaar over en weer een presentatie aan te horen. Door wekelijks fysiek samen te werken, veranderen de aard en de diepgang van analyses en de publicaties voor de Assistent in Opleiding (AIO) niet, maar de realiteitszin en industriële inpasbaarheid van het onderzoek en de AIO zelf na zijn promotie wel degelijk.

Jan van Eijk heeft bij het Philips Centrum voor Fabricage Technologie (CFT) een belangrijke basis gelegd voor multidisciplinair samenwerken met wederzijds begrip en respect [26] en die is toegepast in de ontwikkeling van tal van mechatronische producten. Niet sequentieel en geclusterd per discipline, maar gelijktijdig en multidisciplinair en op basis van projectteams aangestuurd door projectleiders met verstand van de inhoud. Dit laatste in tegenstelling tot wat in vele boeken en cursussen wordt benadrukt. Frequente interactie op (meer dan) wekelijkse basis en gemeenschappelijke projectruimtes zijn hierbij essentieel.

Het High Tech Systems Center (HTSC), dat begin 2015 officieel van start is gegaan en daarmee invulling gaf aan het gebrek aan een mechatronisch research center in Nederland, kan in mijn ogen een hele wezenlijke bijdrage leveren aan de invulling en executie van multidisciplinair onderzoek en onderwijs aan de TU/e, bij voorkeur in nauwe samenwerking met andere (technische) universiteiten (TUD, UT en KUL). En daarmee aan de opleiding van multidisciplinair georiënteerde ontwerpers, ontwikkelaars en onderzoekers. Belangrijke ingrediënten hierin zijn gemeenschappelijke lab-ruimtes voor overleg en testopstellingen voor experimenteel onderzoek. Maar ook sturing vanuit fellows met ruime (brede) industriële ervaring om de diverse disciplines met elkaar te verbinden en het systeemdenken te introduceren in de programmalijnen en het onderzoek. Ook hier gaat het vooral om het kweken van begrip en respect voor andere disciplines, niet om het opleiden van generalisten.

Vorming van consortia – Nationale R&D Werkgroep Mechatronica

Vanaf eind jaren 1990 zijn tal van programma's opgezet, aanvankelijk door of met hulp van de Nederlandse overheid. Het doel van deze programma's was om via consortia het Nederlandse High Tech Systems (HTS)-ecosysteem verder te versterken op de internationale markt.

In 1999 werd het Innovatiegerichte Onderzoeksprogramma Precisietechnologie (IOP) opgericht om een extra impuls te geven aan het onderzoek in precisietechnologie in Nederland. Dit deden ze door het bedrijfsleven actief te betrekken bij onderzoeksprojecten van kennisinstellingen en universiteiten. Met succes, gezien de output van vele projecten als 'Adaptieve Optiek', 'NANOMEFOS' en 'Smartmounts'. Dit was een vruchtbare tijd voor samenwerking met kennis, subsidie en menselijk kapitaal als 'incentive' en 'beloning'. Om de positie van Nederland als kenniseconomie verder te versterken, wat van belang was vanwege opdrogende aardgasbaten, is in 2007 uit het IOP het Programme for High Tech Systems (PfHTS) opgericht, een platform bestaande uit OEM-bedrijven, toeleveranciers en kennisinstellingen. Toeleveranciers kregen hierin een actieve rol toebedeeld bij innovaties, om OEM-ers in staat te stellen niet alleen de maakfunctie, maar ook het ontwerp te gaan uitbesteden om zich zo toe te kunnen leggen op marketing en ontwikkeling van nieuwe producten.

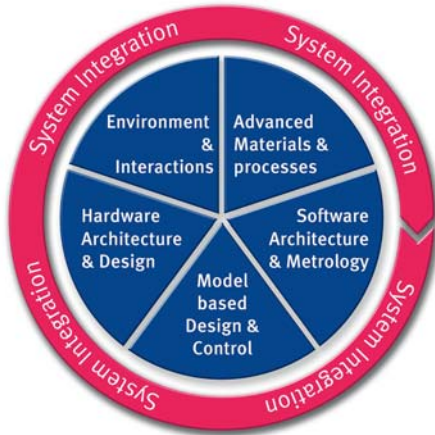
Eind 2008 hield het PfHTS al op te bestaan door een aangedrongen fusie met netwerkorganisatie Point One, dat naast 'Nano-elektronica' en 'Embedded systems' ook het technologiegebied 'Mechatronica' ging bestrijken. In de nieuwe opzet, waarin deelnemende bedrijven en kennisinstellingen lid werden van de vereniging, werd een roadmap opgesteld als basis voor een meerjarenplan, waaruit

vervolgens *calls* voor projecten werden geformuleerd. De bijbehorende R&D-werkgroep Mechatronica, die was voortgekomen uit de tijd van het PfHTS en waarvan ik begin 2011 voorzitter werd, stelde zich ten doel naast de netwerkfunctie en het actualiseren van de betreffende Mechatronica-roadmap, nieuwe samenwerkingsprojecten te definiëren via consortia. In die tijd ging dat nog met behulp van overheidssubsidie in programma's als 'Pieken in de Delta'. De grote samenwerkingsprojecten die ontstonden, waaronder '*Adaptieve Optics*' en '*Xtreme Motion*', werden gesubsidieerd door SenterNovem.

Na het wegvallen van nationale overheidssubsidie en door de invoering van het Topsectorenbeleid in 2012, waar ook de Topsector High Tech Systems and Materials (HTSM) deel van uitmaakte, had de overheid zich ten doel gesteld schaarse middelen zo goed mogelijk in te zetten en moesten bedrijven, onderzoekers en de overheid nauwer met elkaar samenwerken in Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI). Omdat een bestedingsgrondslag bij een kennisinstelling een vereiste was om in aanmerking te komen voor TKI-subsidietoelagen, zijn samenwerkingsprojecten tussen meerdere partijen hiermee niet (echt) van de grond gekomen. Om die reden zijn ASML en IBS Precision Engineering in 2013 gestart met de vorming van een volledig door de industrie betaald consortium rond het thema '*Advanced Thermal Control*', wat vorig jaar van start is gegaan als onderdeel van het High Tech Systems Center en dat nu model staat voor nieuwe industriële consortia in oprichting. Het eerste schaap is over de dam en vanwege de interactie en kennisuitwisseling rond generieke thema's hoop ik van harte dat hier op korte termijn, mede geïnitieerd vanuit de eerder genoemde R&D-werkgroep, een aantal nieuwe samenwerkingsverbanden uit zullen ontstaan.

HTSC en Mechatronica 2.0

In aansluiting op de toenemende complexiteit op component-niveau, dat vraagt om een verdergaande interactie van meerdere aangrenzende vakgebieden, Mechatronica 2.0, is het goed deze verbreding ook terug te zien in de onderzoeklijnen van het HTSC. De eerste insteek was voornamelijk werktuigbouwkundig en elektrotechnisch georiënteerd, met enige overlap in de onderzoeklijnen. De recente representatie (zie Figuur 10) heeft echter naast 'Hardware Architectuur & Ontwerp' ook 'Software Architectuur & Metrologie', en naast omgevingsonzekerheden en regeltechnische verstoringen, een uitbreiding naar tweezijdige interactie tussen systeem en omgeving (vooral voor autonome systemen en robotica van belang). En naast 'Model gebaseerd Ontwerpen & Regeltechniek' zijn ook 'Geavanceerde Materialen & Processen' opgenomen.



Figuur 10

Onderzoekslijnen van het High Tech Systems Center van de TU/e (2016).

Bij Mechatronica 2.0 gaat het om het bedenken van gebalanceerde oplossingen voor de (super) complexiteit op een lager abstractieniveau. Verwachte technologische uitdagingen voor toekomstige mechatronische hightech-systemen zijn [27, 28]:

- Vanwege toename in **complexiteit** wordt een multi-fysische, inclusief cyber-fysische⁸, aanpak essentieel, gebruikmakend van multi-fysische modellen en virtuele machines.
- Vanwege toename in **kalibratietijd** als gevolg van (verandering in) externe verstoringen en/of verloop van parameters, bijvoorbeeld als gevolg van thermische drift, wordt, met het oog op verhoogde nauwkeurigheid, zelfkalibratie een zinvol alternatief op basis van zelf-diagnoses, mogelijk gevolgd door zelf-reparatie.
- Vanwege toename in **resolutie en/of mechanische flexibiliteit** als gevolg van toenemende afmetingen worden geregelde systemen gedistribueerd, mogelijk multi-agent, multi-variabel en zelf-aanpassend, geoptimaliseerd naar het betreffende werkpunt.
- Vanwege gevraagde **personalisatie** wordt maatwerk en flexibiliteit in fabricage en assemblage essentieel, gebruikmakend van technologieën als 3D-printen (*Additive manufacturing*). Ontwikkelingen in de ICT zie ik hierbij als *enabler* voor toekomstige *hightech*-systemen en niet als hoofdstroom, zoals momenteel wordt ingestoken vanuit de Topsectoren in de vorm van 'Smart Industry'.

⁸ Cyber fysische systemen zijn systemen van samenwerkende computationele elementen welke fysische entiteiten besturen [29].

Leerstoel Mechatronic Systems Design

“Education is not preparation for life; education is life itself.” – John Dewey.

Werktuigbouwkunde en Mechatronica

Ik heb bijzonder veel respect en waardering voor een van mijn voorgangers, professor Wim van der Hoek, die vanuit zijn positie bij het CFT van Philips, in 1962 begon als deeltijdhoogleraar aan deze universiteit (voorheen Technische Hogeschool). Hij wist met buitengewoon veel overgave zijn liefde voor techniek op mensen over te brengen. In zijn ‘Des Duivels Prentenboek’, heeft hij zijn inzichten op het gebied van bedrijfsmechanisatie vastgelegd en toegankelijk gemaakt voor generaties (jonge) construerende ingenieurs. Het schreef het dictaat in het Nederlands, daar had hij, de oorlog van heel dichtbij meegemaakt hebbende, alle reden voor: Hij was als de dood dat het materiaal in ‘verkeerde’ handen zou vallen. Hij wist zijn inzichten te verwoorden alsof hij zelf in het materiaal was gekropen en voelde wat comfortabel was [30, 31]. Tot op de dag van vandaag wordt het materiaal gebruikt, verder aangevuld en ondertussen in het Engels vertaald, in het universitair onderwijs (Constructie Principes) en voor bedrijfstrainingen.

Professor Wim van der Hoek zette in zijn afscheidsrede in 1985 ‘werktuigbouw’ nog neer volgens de onvolprezen definitie van Tellegen als ‘het bouwen van tuig dat werkt’. ‘Werktuigbouwers’ noemde hij, vanwege de hiermee samenhangende afkomst van boeren, schippers en ondernemers, ‘underdog’ en daar hadden ze het volgens hem ook zelf naar gemaakt [22]. Hoewel ik begrip en zelfs sympathie heb voor het betoog van professor Van der Hoek, denk ik dat deze definitie vandaag de dag niet meer actueel is. Ja, we vinden nog altijd betrekkelijk weinig werktuigbouwkundigen in hogere managementposities, maar langs de technische as is voldoende ruimte en erkenning voor mensen met brede werktuigbouwkundige systeemkennis. Gezien het multidisciplinaire gedrag van moderne precisietechnologische systemen, rijkt deze tegenwoordig aanmerkelijk verder dan een halve eeuw geleden. Ondanks mijn voorliefde voor precisiemechanica en kinematisch construeren, waar mijn achtergrond ligt, heb ik ook de charme van de zoektocht naar het meer ‘globale optimum’ met een ‘gebalanceerde complexiteit’ in een multidisciplinaire oplossingsruimte weten te waarderen en eigen gemaakt, in de volksmond ‘Mechatronica’ genoemd.

Onderwijs en onderzoek

Ik zou er echter allerm minst voor willen pleiten om het monodisciplinaire onderwijs in kern-disciplines in het Bachelor College (B.Sc.) en het Mastergedeelte van de Graduate School (M.Sc.) van de diverse faculteiten te vervangen door verbredende multidisciplinaire opleidingen als Mechatronica. Daarmee sluit ik me volledig aan bij het strategische beleid van deze universiteit, die de stap naar multidisciplinariteit ziet weggelegd voor aangesloten Research Centers en Instituten. Wat ik wel toejuich, is een cursorische verbreding ‘na’ de Masteropleiding, zoals geboden in de PDEng (Professional Doctorate in Engineering)-opleidingen van het Stan Ackermans Instituut, dat nu verbonden is aan de 3TU Federatie⁹. En ook de nieuwe PDEng opleiding ‘*High Tech Systems Design*’ (HTSD), die vorig jaar aan het HTSC van start is gegaan. Let wel, ik zeg nadrukkelijk ‘na’ de master. Persoonlijk geloof ik niet in meerwaarde van een multidisciplinaire Master- of HBO-opleiding. Sterker nog, ik zie dit sterk ten kosten gaan van de benodigde diepgang voor een ingenieur. In de bijdrage die ik in het college ‘*Applications of Design Principles*’ van de TU/e Graduate School lever, richt ik me dan ook primair op ‘werktuigbouwkundig construeren’ als onderdeel van een mechatronisch systeem. Daarnaast wil ik graag ook een bijdrage gaan leveren in het nieuwe multidisciplinaire PDEng-curriculum van de genoemde HTSD-opleiding. Hier zou ik een bredere *system engineering*-insteek vanuit de industriële praktijk uiteen willen zetten, net zoals in de verkorte cursus ‘*Precision Engineering*’ aan Cranfield University, waar ik de afgelopen jaren een bijdrage verzorg.

Hoewel ik me vanuit mijn achtergrond meer *engineer*¹⁰ dan wetenschapper¹¹ voel – wellicht is de combinatie in de term *technoloog*¹² het meest treffend – vind ik het bijster interessant om met een team van ontwerpers en onderzoekers, op basis van bestaande en nieuwe kennis en tools, natuurlijke fenomenen fundamenteel te bestuderen en een oplossing te zoeken voor een industrieel probleem. Naast het begeleiden van afstudeerders, die werken aan ontwerp en analyse van

⁹ De 3TU Federatie zet zich als samenwerkingsverband tussen de drie technische universiteiten in Nederland, TU Delft, TU/e en Universiteit Twente in voor versterking en bundeling van technologische kennis.

¹⁰ Engineering is het doelgerichte proces van ontwerpen en ontwikkelen van machines en systemen om natuurlijke fenomenen uit te buiten voor praktisch menselijk doel, vaak (maar niet altijd) gebruikmakend van resultaten en technieken uit de wetenschap [32].

¹¹ Wetenschap is met redenen omkleed onderzoek of studie naar natuurlijke fenomenen, bedoeld om blijvende principes te ontdekken onder de elementen van de fenomenale wereld door formele technieken zoals wetenschappelijke methoden aan te wenden.

¹² Technologie is gewoonlijk het gevolg van wetenschap en engineering. Wetenschappers en engineers kunnen beiden worden beschouwd als technologen; de drie velden worden vaak als één beschouwd als het gaat om research of als referentie.

(deel)systemen voor uiteenlopende industriële applicaties, begeleid ik momenteel een tweetal promotieprojecten. Het eerste project is in samenwerking met ASML op het gebied van supergeleidende planaire motoren (een ander project over actieve *wafer*-tafels moet nog starten). Het tweede project is in samenwerking met Philips HealthTech en gaat over het mechatronische ontwerp van een nieuw systeem voor vasculaire en interventionele radiologie.

Dankwoord

“We all have idols. Play like anyone you care about, but try to be yourself while you’re doing so.” – B.B. King.

Dit brengt me aan het einde van mijn betoog.

Het was een grote eer, door Maarten Steinbuch twee jaar geleden gevraagd te worden om een positie als deeltijdhoogleraar in zijn groep te bekleden. Ik heb er, na overleg bij ASML met Bart Noordam en Jos Benschop, en thuis met Yvonne, eerlijk gezegd niet lang over na hoeven denken. Ik ben nu ruim een jaar werkzaam aan de universiteit en ik vind de combinatie met mijn baan bij ASML echt geweldig.

Enkele woorden van dank zijn op zijn plaats.

Op de eerste plaats ben ik mijn werkgever ASML zeer dankbaar, in het bijzonder prof.dr.ir. Jos Benschop, SVP Technology, bij wie ik in 2007 aanklopte voor een baan (aanvankelijk bij Systems Engineering, later Research). Jos heeft me geïnspireerd, uitgedaagd en de ruimte gegeven om research en voorontwikkeling naar eigen ideeën in te richten. Hij heeft me altijd gesteund, zo ook bij deze benoeming.

Speciale dank ben ik verschuldigd aan al mijn ASML-collega's met wie ik in de afgelopen jaren heb samengewerkt en van wie ik enorm veel heb geleerd (één grote leerschool). Ik nodig jullie hierbij van harte uit het onderzoek aan de universiteit te ondersteunen en je unieke kennis en ervaring in te brengen. In het bijzonder wil ik noemen mijn vorige en huidige baas, prof.dr. Bart Noordam en dr.ir. Frank Schuurmans, beide naast technologie- ook vooral *people manager*. Bedankt voor jullie steun en vertrouwen.

Aan de Technische Universiteit Eindhoven wil ik mijn dank uitspreken, allereerst aan het College van Bestuur, dat ik zeer erkentelijk ben voor het vertrouwen mij op deze plaats te benoemen. Maar ook aan mijn collega's van de faculteit Werktuigbouwkunde. Dr.ir. Nick Rosielle als naaste collega in het bijzonder,

voor zijn creatieve en bestendige wijze waarop hij zich voor het vakgebied van werktuigbouwkundig construeren in Nederland blijft inzetten. En ten slotte aan collega's van andere faculteiten en het High Tech Systems Center. Ik kijk uit naar een nauwe en nieuwe vorm van samenwerking over de faculteiten heen.

Prof.ir. Wim van der Hoek, prof.dr.ir. Jan van Eijk, ir. en senior fellow bij ASML Erik Loopstra en prof.dr.ir. Maarten Steinbuch wil ik bedanken voor hun baanbrekend en inspirerend werk als 'rolmodel', ieder in zijn eigen vakgebied en op zijn eigen manier, maar bovenal grensverleggend door inzicht en leiderschap, wat heeft bijgedragen tot waar ik nu sta.

Dames en heren, de balans van vandaag over mechatronische complexiteit heeft een bredere analogie, en wel in de combinatie van werk en privé.

Yvonne, dank je wel voor je steun, je geduld en de ruimte die je me geeft. En voor je verruimende inzichten, niet eens altijd uitgesproken, die mij hebben gemaakt tot wie ik nu ben. Isabelle, Tobias en Bernice, bedankt voor wie jullie zijn en voor de spiegel die jullie me dagelijks voorhouden.

Ik heb gezegd.

Referenties

1. Evans, C., *Precision Engineering: An Evolutionary View*, Cranfield Press, Bedford, ISBN 1 871315 01 8, 1989.
2. Bryan, J.B., *The Power of Deterministic Thinking in Machine Tool Accuracy*, Lawrence Livermore National Laboratory Report UCRL-91531, The first International Machine Tool Engineers Conference, Tokyo, Japan, 1984.
3. Usher, A.P., *A History of Mechanical Inventions*, Cambridge, MA, 1959.
4. Schellekens, P., Rosielle, N., Vermeulen, H., Vermeulen, M., Wetzels, S., Pril, W., *Design for Precision: Current status and trends*, Keynote paper on precision engineering & metrology, Journal: CIPR Annals – Manufacturing technology, Volume 47, Number 2, pp. 557-586, 1998.
5. Rosielle, private communication, 2015.
6. Steinbuch, M., *Regeltechniek in Beweging*, Intreerede, Technische Universiteit Eindhoven, 19 september 2003.
7. Butler, H., *De Nanometer onder de Duim*, Intreerede, Technische Universiteit Eindhoven, 14 juni 2013.
8. Teague, E.C., Evans, C., *Patterns for Precision Instrument Design (Mechanical Aspects)*, National Institute of Standards and Technology, Tutorial Notes, ASPE Annual Meeting, Norfolk, Virginia, 1989.
9. Teague, E.C., 1997, *Basic Concepts for Precision Instrument Design: Designing Instruments and Machines to have a High degree of Repeatability*, National Institute of Standards and Technology, Tutorial Notes, ASPE Annual Meeting, Norfolk, VA, 1997.
10. Teague, E.C., 1997, *Basic Concepts for Precision Instrument Design: Some Draft Notes and Papers*, National Institute of Standards and Technology, Tutorial Notes, ASPE Annual Meeting, Norfolk, Virginia, 1997.
11. McKeown, P.A., Dunsdale, J., Wills-Moren, W.I., *The Design of High Precision Machines and Systems, Course notes*, College of Manufacturing, Cranfield, 1973-1997.
12. Bryan, J.B., *The Deterministic Approach in Metrology and Manufacturing*, Proc. of the ASME International Forum on Dimensional Tolerancing and Metrology, Dearborn, Michigan, 1993.

13. Munnig Schmidt R., Schitter, G., Rankers, A., Eijck, J. v., *The Design of High Performance Mechatronics, High-tech Functionality by Multidisciplinary System Integration*, IOS Press BV, ISBN 978-1-61499-367-4, 2014.
14. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Volume 1, Number 1, March 1996.
15. Moore, G.E., *Cramming more components onto integrated circuits*, *Electronics*, Volume 38, Number 8, 19 april 1965.
16. <http://www.forbes.com/sites/dorieclark/2013/08/08/four-things-you-need-to-know-in-the-big-data-era/>, 8 april 2013.
17. http://www.lithoguru.com/scientist/essays/EUV_SST.html, 2011.
18. Phillips, M., *Mask challenges in complementary EUV/193i patterning*, Intel Corporation, Photomask Japan, Yokohama, Japan, 21 April 2015.
19. <http://electronics360.globalspec.com/article/4760/tsmc-orders-euv-lithography-tools-for-production>, 25 november 2014.
20. <http://electronics360.globalspec.com/article/5264/intel-orders-15-euv-lithography-systems>, 23 april 2015.
21. Benschop, J.P.H., *Innovation in a changing world*, Strategiedag High Tech Systems Center, Heeze, 2 november 2015.
22. Hoek, W. v.d., *Leren construeren? Vallen en opstaan!*, Afscheidsrede, Technische Hogeschool Eindhoven, 1 maart 1985.
23. Peijnenburg, T., *Systems Thinking*, VDL Enabling Technologies Group, 2015.
24. Zwol, P.J., et al, *Emissivity of freestanding membranes with thin metal coatings*, *Journal of Applied Physics* 118, 213107, 7 december 2015.
25. Purtov, J., Frensemeier, M., Kroner, E. *Switchable adhesion in vacuum using bio-inspired dry adhesives*, *Journal: ACS Applied materials & interfaces* 2015, 7, 24127-24135, 2015.
26. Eijck, J. v., *Mechatronisch, Scheppend Samen Werken*, Intreerede, Technische Universiteit Delft, 21 februari 2001.
27. Steinbuch, M., Pahnke, K., Sperling, F., *Business plan High Tech Systems Center*, 27 november 2014.
28. Pahnke, K., *HTSC Strategy Session*, Heeze, 2 november 2015.
29. https://en.wikipedia.org/wiki/Cyber-physical_system.
30. Hoek, W. v.d., *Het voorspellen van dynamisch gedrag en positionerings-nauwkeurigheid van constructies en mechanismen*, Collegediktaat Technische Hogeschool Eindhoven, 1967.
31. Hoek, W. v.d., *Des Duivels Prentenboek 6A*, Collegediktaat Technische Hogeschool Eindhoven, 1981.
32. <https://en.wikipedia.org/wiki/Technology>

Curriculum vitae

Prof.dr.ir. Hans Vermeulen is per 1 april 2015 aangesteld als deeltijdhoogleraar Mechatronic Systems Design aan de faculteit Werktuigbouwkunde van de Technische Universiteit Eindhoven.

Hans Vermeulen (1970) studeerde Werktuigbouwkunde aan de TU/e (1994) en een post-master MTD opleiding Mechatronic Design aan het Stan Ackermans Instituut van de TU/e (1996). In 1999 promoveerde hij binnen de vakgroep Precision Engineering op ontwerp en ontwikkeling van een *ceramic optical diamond turning machine*. Na acht jaar voorontwikkeling bij Philips CFT (later Apptech) en Philips Electronics North America Corporation (Pittsburgh, PA), trad hij in 2007 in dienst bij ASML Research als projectleider en systeemarchitect. Van 2012 tot 2014 was hij groepsleider Mechatronics & Control Research en sinds 2012 stuurt hij het EUV Scanner Research programma aan met onderzoek naar onder andere contaminatiebeheer van *reticles*, plasma- en fotoninteractie met EUV-spiegels, en mechatronica, thermische beheersing en elektrostatische *clamps* voor volgende generatie EUV-systemen. Zijn leerstoel focust op vernieuwende concepten voor uiterst nauwkeurige en snelle positionersystemen voor IC-lithografie en medische toepassingen, met een accent op reproduceerbare mechanica. Vanaf 2011 is hij voorzitter van de nationale R&D werkgroep Mechatronica, recentelijk verbonden aan het HTSC.

Colofon**Productie**

Communicatie Expertise
Centrum TU/e

Fotografie cover

Rob Stork, Eindhoven

Ontwerp

Grefo Prepress,
Eindhoven

Druk

Drukkerij Snep, Eindhoven

ISBN 978-90-386-4086-0
NUR 978

Digitale versie:
www.tue.nl/bib/

Bezoekadres

De Rondon 70
5612 AP Eindhoven

Postadres

Postbus 513
5600 MB Eindhoven

Tel. (040) 247 91 11
www.tue.nl/plattegrond