

NEVAC

jaargang 62 nummer 3 december 2024



NEDERLANDSE
VACUÛMVERENIGING

blad

Vacuümaspecten
van EUV-scanners

Foto-elektronenspectroscopie
buiten de grenzen
van ultrahoog vacuüm

Modellering van
meertraps Roots-vacuümpompen





Verenigingsgegevens

Ereleden

L.G.J.M. Hassink
† G. Ikkinck
† Prof.dr. J. Kistemaker
† Ir. J.H. Makkink
Th. Mulder
Dr.ir. E.P.Th.M. Suurmeijer
Prof. dr. J.F. van der Veen
Dr.ir. J. Verhoeven

Bestuur

Freek Molkenboer, voorzitter
Sense Jan van der Molen, vicevoorzitter
René Erkelens, penningmeester
Pieter Heidema, secretaris

Verenigingssecretariaat

Pieter Heidema
secretaris@nevac.nl

Ledenadministratie

René Erkelens
penningmeester@nevac.nl

Penningmeester NEVAC

IBAN: NL50 INGB 0001 8515 29
o.v.v. penningmeester NEVAC
René Erkelens
penningmeester@nevac.nl

Contributies

Contributie € 30,- per jaar
Studenten/promovendi € 5,- per jaar
Bedrijfsleden € 175,- per jaar

Inlichtingen over opleidingen en examens

Dr. Gesa Welker
g.welker@gmx.net

Vacuümboeken uitgegeven onder
auspiciën van de NEVAC:



Samenwerken om niet(s)

Het vacuüm is een uitdagende omgeving voor de onderzoeker en de engineer om mee te werken. Het onderzoek aan vacuümverschijnselen en de ontwikkeling van vacuümtoepassingen vragen dan ook om samenwerking, multifysisch en multidisciplinair.



Ook op het niveau van de vakverenigingen is die samenwerking heel zinvol. Onze nieuwe voorzitter, Freek Molkenboer, schreef er in het vorige nummer al over. Het is dan ook goed om te zien dat de NEVAC volop in het 'circuit' zit. Vorige maand waren we weer met onze Ask the Expert Booth vertegenwoordigd op de Precisiebeurs, waar veel van onze leden als exposant dan wel bezoeker acte de présence gaven. Vacuüm is immers onmisbaar voor veel precisietechnologie.

Verder hebben we dit jaar de banden met de Nederlandse Natuurkundige Vereniging aangehaald. Dat resulteerde in een mini-themanummer over vacuüm voor het Nederlands Tijdschrift van Natuurkunde, met stevige inbreng vanuit NEVAC-geleden. Verder waren we betrokken, met onder meer een presentatie over vacuüm, bij een bezoek van NNV-leden aan TU Delft en TNO in Delft. Lees meer hierover in dit nummer.

Samenwerking is er ook rond de IUVSTA-workshop die TNO en de NEVAC begin volgend jaar organiseren in Delft; zie de update in dit nummer. Partners zijn hier DSPE (Dutch Society for Precision Engineering), VCCN (Vereniging Contamination Control Nederland) en Mikrocentrum, het onafhankelijke kenniscentrum voor de maakindustrie dat onder meer de Precisiebeurs organiseert. Hoe meer draagvlak er is voor zo'n groot event, want dat is een workshop van bijna een week met tot wel 150 deelnemers, hoe groter de kans op een geslaagde uitvoering.

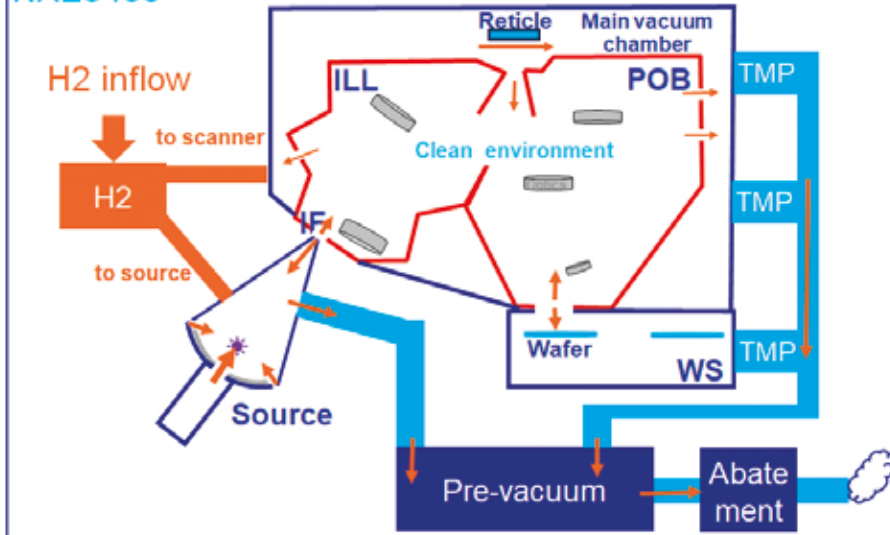
Voor het vullen van een nummer van het NEVAC blad is samenwerking ook onontbeerlijk. Met onze gewaardeerde adverteerders en met auteurs van artikelen die ons blad hopelijk lezenswaardig maken. Dit keer komen de verhalen van ASML (wie wil ze niet zijn blad hebben), Atlas Copco en ARCNL. Ik hoop dat deze artikelen en het overige nieuws in dit nummer jullie veel leesplezier bezorgen. Rest me om jullie alvast fijne feestdagen te wensen en een gezonde start van 2025.

Namens de redactie,
Hans van Eerden

Inhoud

- 2 Van de redactie
Samenwerken om niet(s)
- 4 Vacuümaspecten van
EUV-scanners
Maximale transmissie,
minder nanodeeltjes,
minimaal energieverbruik
- 9 Update IUVSTA-workshop
Sprekerslijst compleet,
aanmelding open
- 10 Foto-elektronenspectroscopie
Buiten de grenzen van
ultrahoog vacuüm
- 15 Van het bestuur
Inclusief: Aankondiging
NEVAC-dag
- 16 Lekkage en speling
Modellering van meertraps
Roots-vacuümpompen

NXE3400



- 22 Beste geslaagde
Kevin Batenburg
(Universiteit Twente)

4

Vacuümontwerp voor EUV-scanner
plus EUV-bron. (Bron: ASML)

Cover

De beste geslaagde van dit jaar,
Kevin Batenburg (Universiteit
Twente), bij het clustersysteem dat de
onderzoeksgroep Integrated Devices
and Systems zelf heeft gebouwd.
(Foto: Kees van der Zouw)

- 24 Nieuws
- 26 Stel je voor
Mark Driessen
- 27 Agenda

Colofon

Redactie

Rients de Groot
Aart Kleyn
René Koops
Ronald Sheriff
Hans van Eerden (eindredacteur)
redactie@nevac.nl

Grafische vormgeving

Snep

Druk

Drukkerij Tielen

Verschijningsdata 2025

April / September / December

Web-adres

www.nevac.nl

Abonnementen (voor niet-leden)

Binnenland € 100,- per jaar
Buitenland € 150,- per jaar

Advertentie-exploitatie

NEVAC
René Erkelens
penningmeester@nevac.nl

Kopij inzenden naar redactie@nevac.nl.
Lidmaatschap en abonnementen
opgeven bij de ledenadministratie,
penningmeester@nevac.nl.

Vergoeding kopij

Artikelen in het Nederlands over
vacuümtechniek en haar toepassingen
in wetenschap en industrie worden
door de redactie zeer op prijs gesteld.
Voor studenten en promovendi is
een vergoeding beschikbaar van
€ 250,- per gepubliceerd artikel.

ISSN 0169-9431

Sluitingsdatum kopij

NEVAC blad 2025 nr. 1:
28 februari

Maximale transmissie, minder nanodeeltjes, minimaal energieverbruik

De vacuümomgeving is een cruciaal onderdeel van ASML's EUV-scanners voor het maken van de nieuwste chipgeneraties met Extreme UV lithografie. Het vacuümontwerp heeft dan ook de volle aandacht van de Veldhovense litho-gigant. In samenwerking met leveranciers wordt er voortdurend gewerkt aan het optimaliseren van het ontwerp, met aandacht voor de optische transmissie, het voorkomen van nanodeeltjes en het minimaliseren van het energieverbruik. Dit laatste aspect zal met het almaar toenemende EUV-vermogen en de steeds scherpere eisen voor reductie van CO₂-emissies de komende jaren een zeer actueel onderwerp zijn.

Mark van de Kerkhof, Ton van der Net, Jeroen van den Brink, Ton van de Kerkhof en Kees Feenstra (ASML)



Figuur 1. Het werkpaard van EUV-lithografie, de NXE scanner; met het lichtpad in paars, de bron rechtsonder, het masker bovenin en de wafer onderin.

Inleiding

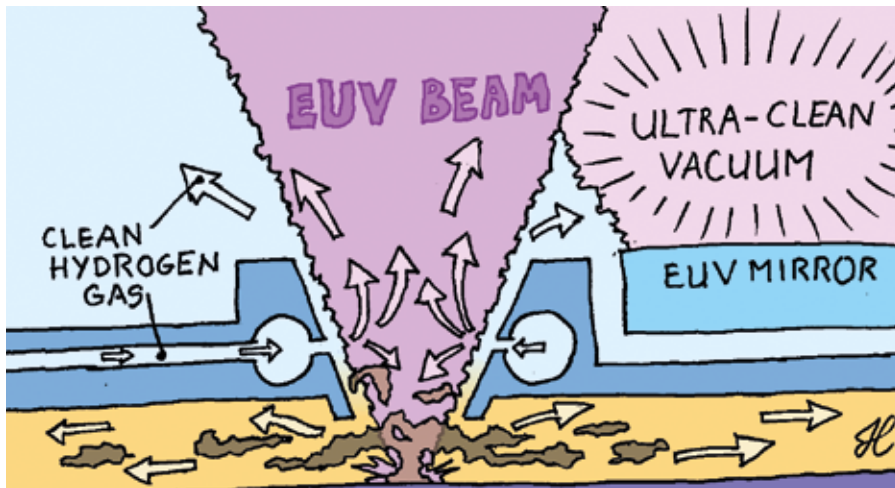
Optische lithografie is de basis voor de revolutie van de afgelopen decennia in geïntegreerde circuits (IC's), waarbij die jaar na jaar krachtiger, goedkoper en zuiniger werden, in lijn met de bekende Wet van Moore. In de laatste jaren heeft Extreme UV (EUV) lithografie de deur geopend naar nog kleinere, nog krachtigere en nog zuinigere chips (M. van de Kerkhof, *et al.*, "Lithography for now and the future", *Solid-State Electronics*, 155 (2019)). De EUV-golflengte van 13,5 nm geeft een ongeëvenaarde resolutie van

10 nm of beter, hetgeen resulteert in superieure elektrische eigenschappen en lager energieverbruik van IC's. Daarmee zijn de EUV-scanners van ASML (Figuur 1) ook een cruciale technologie gebleken voor de introductie van de nieuwe IC-generaties voor kunstmatige intelligentie (AI), waarbij extreme hoeveelheden data en berekeningen worden gebruikt.

In het EUV-regime hebben alle elementen en materialen een significante absorptie, waardoor het optisch pad in de

EUV-scanner in vacuüm moet worden uitgevoerd. Daarnaast betekent dit dat alle optische componenten in reflectie moeten werken, dus spiegels in plaats van refractieve lenzen en ook een reflecterend masker. EUV-spiegels hebben een beperkte reflectiviteit en er zijn meerdere spiegels nodig voor een lithografisch systeem, resulterend in een totale transmissie van ongeveer 1%. Er is dus een krachtige bron nodig van meer dan 100 W EUV om de scanner voldoende wafers per uur te laten belichten en zo het systeem rendabel te maken voor volumeproductie. Ook mogen de spiegels gedurende de levensduur geen reflectiviteit verliezen. Dat is niet vanzelfsprekend, aangezien een EUV-scanner een groot inwendig oppervlak heeft en er een continue stroom van maskers en wafers vanuit buiten het vacuüm door de scanner gaat; uitgassen van koolwaterstoffen (en water) kan dus niet worden genegeerd.

Wanneer koolwaterstoffen adsorberen op de spiegels en daar belicht worden door de energetische EUV-fotonen, treedt



Figuur 2. Het principe van een dynamic gas lock. (Illustratie: H.K. Nienhuys, ASML)

dissociatie op in kleinere fragmenten die vervolgens een dichte koolstoflaag kunnen vormen op de spiegels. Om dit tegen te gaan, is een tweetal maatregelen genomen in het ontwerp van de scanner. Ten eerste wordt er in het systeem een continue stroom van lagedrukwaterstofgas (H_2) gecreëerd, dat reageert met de koolstoflaag tot volatiel methaan en zo continu wordt afgepompt. Ten tweede is de scanner opgedeeld in compartimenten die zijn gescheiden door dynamic gas locks (Figuur 2), waardoor de kwetsbare spiegels geïsoleerd zijn van de uitgassende wafers en maskers. De druk van het achtergrondgas is een paar Pa, hetgeen ongeveer 5% absorptie van EUV kost. Dit is op zich niet verwaarloosbaar, maar het is een veel kleiner verlies dan koolstofgroei op de spiegels zou kosten. Verder is de druk in het compartiment met de optiek hoger dan in de omringende compartimenten, zodat het gas altijd van zeer schoon naar iets minder schoon stroomt.

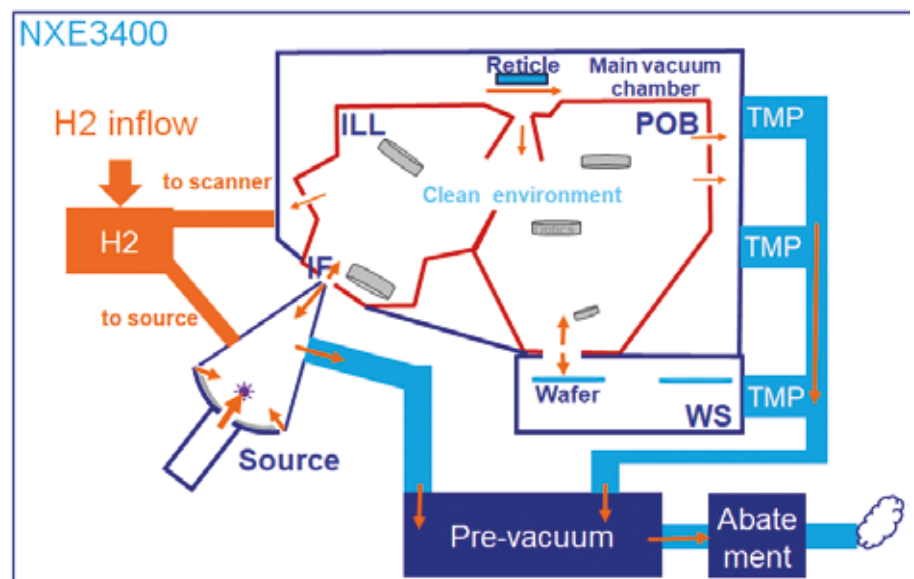
Behalve voor het behouden van optimale transmissie speelt het vacuüm ook een belangrijke rol in het voorkomen dat nanodeeltjes in de scanner terechtkomen op de wafer of het masker. Gezien de minieme dimensies van de afgebeelde patronen in een EUV-scanner kunnen nanodeeltjes vanaf ongeveer 10 nm resulteren in kortsluitingen of onderbrekingen in het microcircuit; dat betekent dat scanners in een extreem streng

regime moeten werken. Nanodeeltjes hebben nauwelijks massa en worden dus nauwelijks beïnvloed door zwaartekracht, waardoor de belangrijkste krachten vanuit het achtergrondgas komen, enerzijds door stroming van het gas en anderzijds door temperatuurgradiënten en diffusie. Verder moet bij afwezigheid van luchtvochtigheid ook het risico van mogelijke elektrische oplading expliciet worden meegenomen.

Dit brengt extra ontwerpisen met zich mee voor het vacuümsysteem (Figuur 3), met name in de overgangsfase van omgevingsdruk naar vacuüm, en vice versa.

Zo moet er tijdens het afpompen van het systeem altijd een purge flow van stikstofgas aanwezig zijn, waardoor weliswaar de afpomptijd wordt verlengd maar deeltjestransport zoveel mogelijk wordt vermeden. Dit zorgt er namelijk voor dat de gasstromen altijd laminair blijven en er geen omkeringen van gasstromen kunnen optreden.

Al deze overwegingen moeten expliciet worden meegenomen in het ontwerp van de verschillende volumes, inlaten en uitlaten. Dit vraagt ook uitgebreide modellering om het vacuümontwerp te ondersteunen in het overgangsgebied tussen het moleculaire en het continue regime. Ook resulteert dit in extra eisen voor de gebruikte materialen en onderdelen; deze moeten niet alleen schoon zijn qua koolwaterstoffen en andere volatiele componenten, maar ook qua nanodeeltjes. Omdat de volatiele reactieproducten moeten worden afgevoerd, zijn er relatief hoge gasdebieten nodig die met behulp van vacuümpompen uit het systeem moeten worden verwijderd. Per generatie nemen het vermogen van de EUV-bron en andere eisen toe; daardoor neigen de gasdebieten omhoog en moet de pompdoorvoer hoger worden. Daarnaast moeten in het totale systeemontwerp veilig-



Figuur 3. Overzicht van het vacuümontwerp voor de EUV-scanner plus EUV-bron, met gescheiden compartimenten, verschillende inlaten en verschillende uitlaten naar een systeem voor afvoer ('abatement', in het Engels) van waterstof.

heid, prestaties, kosten, vloeroppervlak en beschikbaarheid worden beheerst. En moet ook de energie-efficiëntie worden verbeterd; dit geldt met name voor EUV-systemen, die een relatief lage totale efficiëntie hebben. Een niet onaanzienlijk deel van het stroomverbruik is gerelateerd aan het aanvoer- en afvoersysteem voor waterstofgas (~25%). We zullen hieronder dieper ingaan op de aanpak die ASML hanteert om het energieverbruik te beoordelen, en ideeën bespreken – zowel geïmplementeerd als nieuw – om het energieverbruik te minimaliseren. Sommige van deze ideeën zijn ook toepasbaar voor vacuümpompen in andere toepassingsgebieden.

Effectief pompen van waterstof

Voor de hoge gasstromen gebruikt ASML een veelvoud aan turbomoleculaire pompen (TMP's) om de benodigde druk te halen. Het werkbereik voor de TMP's in onze applicatie wijkt af van de normale (ultrahoogvacuüm) toepassingsomgeving. Daarom heeft ASML de TMP-leveranciers gevraagd een speciale TMP te ontwerpen die geoptimaliseerd is voor de hogere drukken en gasstro-

men in de scanner. De uitdaging hier is om een TMP te maken die een hoge compressie heeft voor waterstof en een hoge doorvoer voor waterstof en stikstof (purge gas), waarbij de rotorbladen koel genoeg blijven zodat ze niet interfereren met de temperatuurhuishouding van de scanner. Aangezien een TMP alleen kan worden gebruikt in combinatie met een voorpomp, is het voor de optimalisatie van het totale vacuümsysteem belangrijk om de geïntegreerde combinatie van TMP en voorpomp te optimaliseren. Zo is het gunstig om een hogere voordruk van de TMP te gebruiken om een kleinere voorpomp mogelijk te maken. Aan de andere kant zullen betere voorpompen (lagere voordruk) meer designvrijheid geven voor de TMP's.

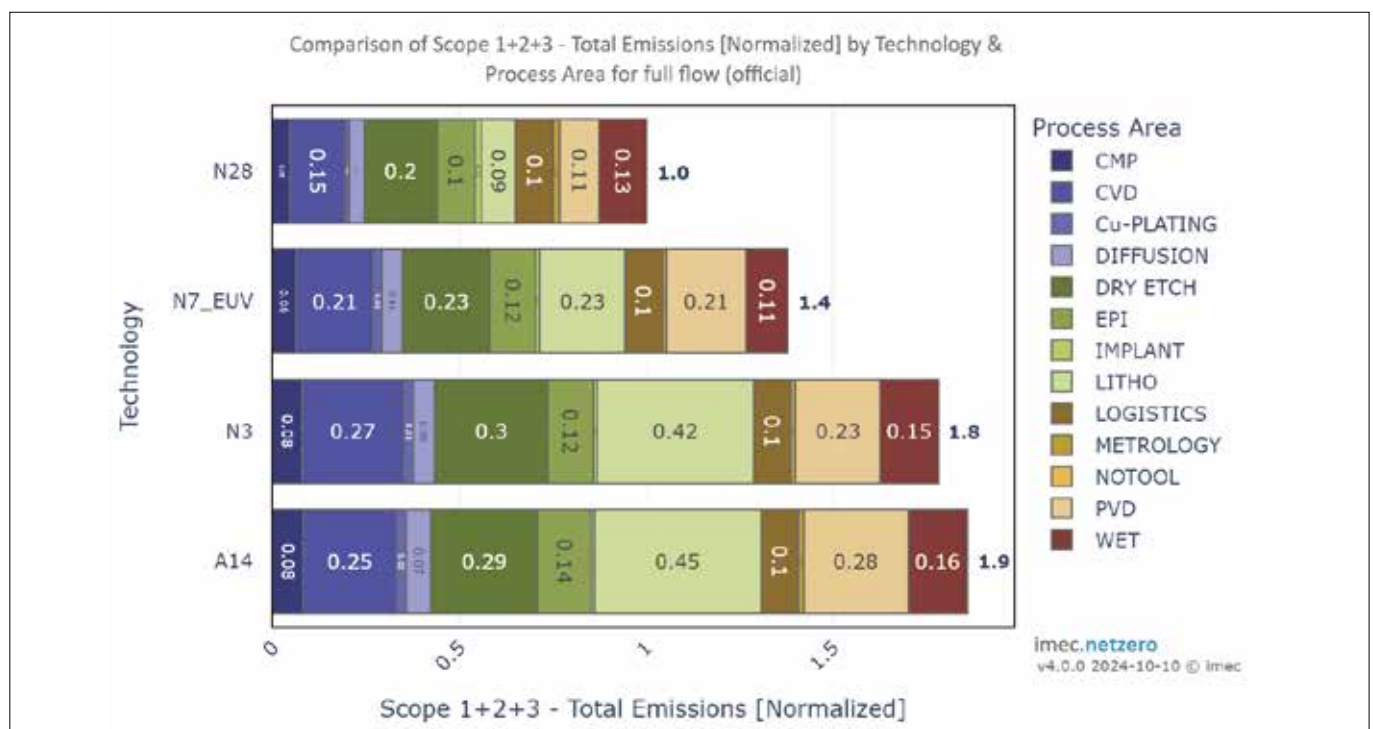
Na de eerste-generatie TMP's is er inmiddels samen met de leverancier een tweede generatie TMP's ontwikkeld. Deze onderscheidt zich van de eerste generatie door een hogere doorvoer en een hogere maximale voordruk, terwijl het volume van de TMP kleiner is geworden. Voor de volgende generatie scanners zal er een nieuwe, derde generatie TMP's worden

ingevoerd, met een verder verbeterde doorvoer bij een lagere inlaatdruk.

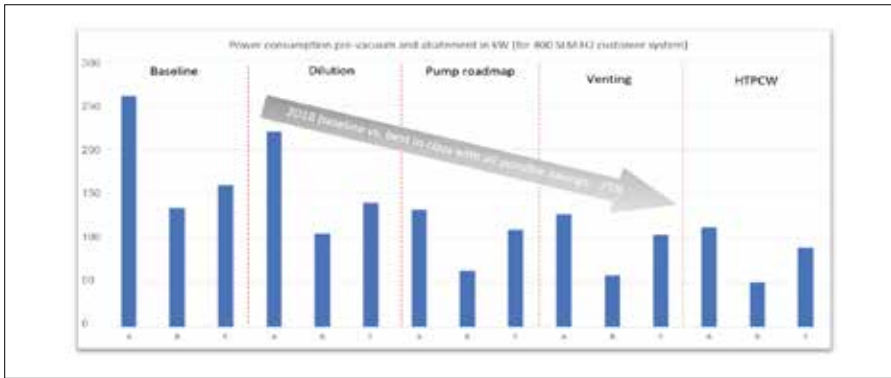
Een andere ASML-specifieke eis is dat de vibraties van de TMP's uitzonderlijk laag moeten zijn, aangezien die kunnen leiden tot lagere afbeeldingskwaliteit en plaatsingsnauwkeurigheid. Het dynamisch gedrag wordt per TMP getest en geoptimaliseerd met ASML's eigen testtools, om te borgen dat de vibraties en krachten die de TMP uitoefent op de scanner laag genoeg zijn. Verder gelden er ook strikte eisen op het gebied van reinheid, zowel tijdens het draaien van de TMP als tijdens stilstand. Dit resulteert in een keuze voor magneetlaging, aangezien hybride lageringen op oliebasis niet schoon genoeg zijn.

Metten van het achtergrondgas

Om zeker te weten dat het vacuümsysteem schoon genoeg is, maakt ASML gebruik van hogedruk-RGA's (residual gas analyzers). Deze RGA's monitoren het vacuüm continu. Ze zorgen voor een OK/NOK-sigitaal voor het mogen aanzetten van de EUV-bron en eventueel voor het uitschakelen van de EUV-bron



Figuur 4. Vergelijking van de bijdragen aan het energieverbruik van verschillende processtappen in het maken van chips voor verschillende generaties. Lithografie (LITHO) is inmiddels verantwoordelijk voor meer dan 20% van het totale energieverbruik. (Data gegenereerd met imec.netzero, de IC-emissiecalculator van imec, versie 3.4.0, augustus 2024).



Figuur 5. Energieverbruik van verschillende componenten van het vacuümsysteem; A, B en C staan voor verschillende leveranciers.

als de vacuümcondities niet meer aan de eisen voldoen, bijvoorbeeld in geval van een vacuümleak. De filtering en versterking van deze RGA zijn van het high-end type; we verwachten meer dan zeven decaden dynamisch bereik van de RGA. De module is custom-made en bevat twee kleine en schone TMP's om de reinheid te garanderen; de module mag immers niet meer gecontamineerd zijn dan het systeem dat hij moet meten. Omdat de ionisatiebron van de RGA niet bij de relatief hoge druk van de scanner (en bron) kan werken, wordt voor de RGA nog een drukreductiestap uitgevoerd, door een parallelgeschakelde TMP.

Op het moment dat de druk tijdens het afpompen laag genoeg is, voert de software een aantal checks uit voordat de scanner in de bedrijfstoestand wordt gebracht. Er stroomt nu zuiver waterstof door de scanner en er mag in principe EUV worden gemaakt. Er wordt dan nog een laatste check gedaan op de hoeveelheid koolwaterstoffen. Als die laag genoeg is, zal het signaal 'klaar voor belichting' worden gegeven en wordt de klep naar de EUV-bron geopend om de lithografische belichtingen te starten.

Duurzaamheid

Naast de klassieke thema's resolutie, levensduur, kosten en productiviteit is ook duurzaamheid een belangrijk thema geworden in de industrie. De grote spelers in de ICT-industrie, zoals Apple, Google en Microsoft, hebben ambitieuze klimaat-

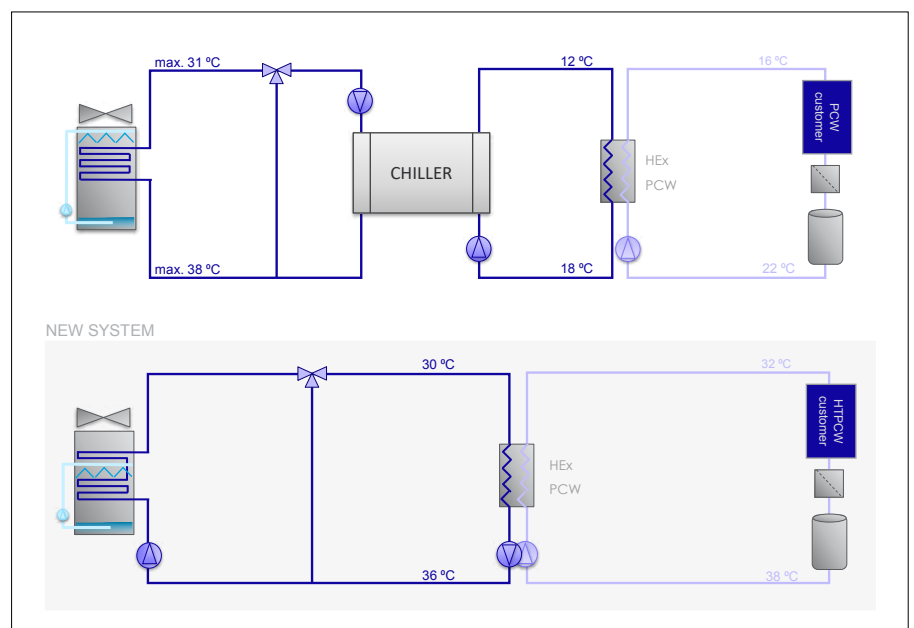
doelstellingen en willen 10-20 jaar eerder dan afgesproken in het klimaatakkoord van Parijs (2050) emissies tot nul reduceren. Deze ambities vertalen zich in een druk op de fabrikanten van IC's, zoals Intel, TSMC en Samsung, om zelf ook ambitieuze doelstellingen na te streven. Dit wordt uiteraard vertaald naar een vraag richting de makers van de apparatuur in de fabriek – waaronder ASML – om plannen voor het reduceren van de emissie veroorzaakt door het fabriceren en gebruiken van deze apparatuur. Dit strookt overigens met de ambitie die ASML zelf al had om bij te dragen aan klimaatdoelstellingen.

Dit betekent dat het voor ASML van grote waarde is om oplossingen te zoeken binnen het productontwerp om emissies te reduceren. Dit valt uiteen in een aantal oplossingsrichtingen:

- Het reduceren van emissies veroorzaakt door de eigen activiteiten.
- Het reduceren van emissies veroorzaakt door de waardeketen (stroomopwaarts), oftewel de materialen gebruikt voor het bouwen van een product.
- Het reduceren van de emissies veroorzaakt door het gebruik van het product (stroomafwaarts).

De eerste analyses laten zien dat de totale emissies van ASML voor 90% worden bepaald door het fabriceren van de onderdelen en het gebruik, respectievelijk voor bijna 1/3 en 2/3 van het totaal. Een recente analyse van IMEC (Figuur 4) laat ook zien dat lithografie voor een steeds groter deel verantwoordelijk is voor de emissies voor het maken van een IC. Het is daarom cruciaal het energieverbruik van een lithografiemachine te reduceren. Zoals al eerder gemeld, wordt maar liefst 25% van het energieverbruik bepaald door het waterstofsysteem.

De grootste verbruikers van energie zijn de installaties voor het genereren van de



Figuur 6. Warmer koelwater (PCW = process cooling water) heeft geen chiller nodig, waardoor het koelcircuit simpeler en energiezuiniger wordt. (Schema's: Marissa Vos, ASML)

waterstof en het systeem van voorpompen (Figuur 5). Dit laatste systeem wordt geïnstalleerd per individuele EUV-machine en voorziet in een aantal functies: voorvacuüm voor de turbopompen van de scanner (typisch tussen de 18 en 40 Pa, 25% van de pompcapaciteit), vacuüm voor de lichtbron (typisch rond de 1,5 mbar bij hoge waterstofstroom, 75% van de pompcapaciteit), verbranden of verdunnen van de afvalwaterstof ('abatement', typisch geïntegreerd in het pompsysteem).

Genereren en afvoeren van waterstof zullen hier niet verder worden besproken. De opbouw van energieverbruik van de pompsystemen is ongeveer als volgt: 60% elektrisch vermogen, 10% koelwater, 10% afvoer van ventilatielucht; de overige 20% zijn voor abatement en stikstof. Mogelijke energiebesparingen zijn:

- Efficiëntere pompen (hogere doorvoer bij gelijk elektrisch vermogen).
- Hogere voordruk van de turbopompen (resultierend in hogere mogelijke werkdruk).
- Reduceren van drukval (resultierend in hogere mogelijke werkdruk).
- Warmer koelwater.

- Adaptieve ventilatie (afhankelijk van systeemtoestand in plaats van maximaal).
- Reductie van hulpgasen zoals stikstof (gebruikt voor efficiëntie en thermisch gedrag van pompen).

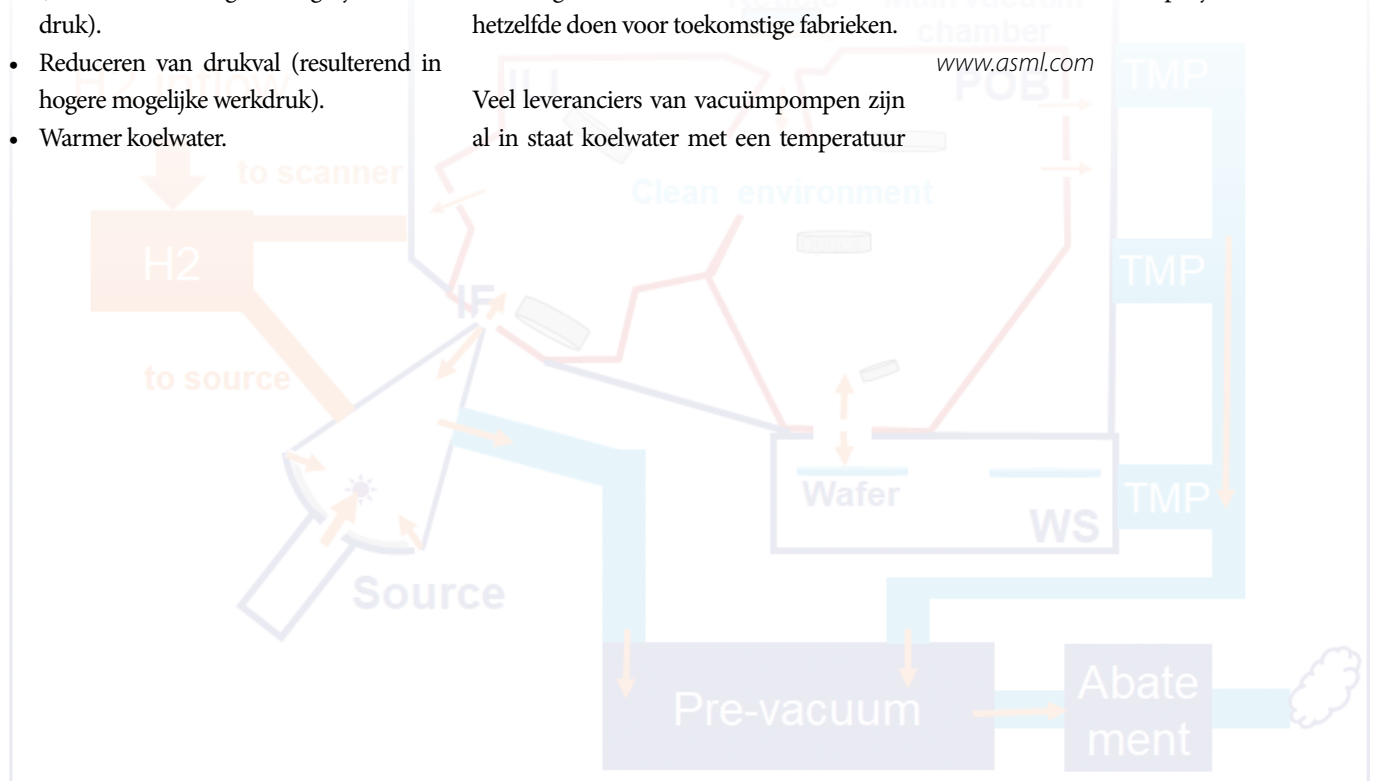
Met name het gebruik van warmer koelwater (Figuur 6) is een besparing die breder in de industrie kan worden toegepast. ASML heeft gekozen voor de praktische bovengrens van 32 °C (high-temperature process cooling water, HTPCW). Deze hogere temperatuur maakt het mogelijk een nieuw koelwatersysteem in te zetten zonder 'chillers', waarmee de grootste energieverbruiker in het systeem wordt geëlimineerd. Als voldoende vacuümpompen gebruik kunnen maken van dit systeem, is het voor de ASML-kanten aantrekkelijk om een dergelijk systeem aan te leggen. Uiteraard zal ASML waar mogelijk ook andere modules van het systeem aansluiten op warmer koelwater. Voor uitbreidingen van de eigen ASML-cleanrooms zal dit nieuwe concept worden gebruikt en meerdere klanten zullen hetzelfde doen voor toekomstige fabrieken.

Veel leveranciers van vacuümpompen zijn al in staat koelwater met een temperatuur

tot 30 °C te gebruiken in de laatste generatie pompen. Ze onderzoeken de mogelijkheden voor nog hogere watertemperatuur en voor implementatie van 30 °C in bestaande installaties. In internationaal verband worden deze mogelijkheden industriebreed besproken, bijvoorbeeld in de werkgroepen van de International Roadmap for Devices and Systems, onderdeel van IEEE.

Conclusie

Zoals hierboven beschreven is de vacuüm-omgeving een cruciaal onderdeel van de EUV-scanner. Het vacuümontwerp heeft dan ook de volle aandacht van ASML, en in samenwerking met de leveranciers wordt er voortdurend gewerkt aan het optimaliseren hiervan, met aandacht voor de transmissie van de optiek, het voorkomen van nanodeeltjes en het minimaliseren van het energieverbruik. Met het alsnog toenemende EUV-vermogen en de steeds scherpere eisen op het gebied van energieverbruik zal dit ook komende jaren een zeer actueel onderwerp zijn.



Update IUVSTA-workshop Ultra-clean vacuum

De IUVSTA-workshop Ultra-clean vacuum, 3-6 februari 2025 in Delft, komt met rasse schreden naderbij en de voorbereidingen liggen op schema. De sprekerslijst is compleet en alle beoogde sprekers hebben toegezegd. Het is een gevarieerd gezelschap uit de werelden van space, semicon en big science, plus een aantal sprekers met meer algemene vacuümdeskundigheid. Ze komen van de bedrijven ASML, Inficon, Vacom, Thermo Fisher Scientific, VAT en VDL ETG. Daarnaast zijn diverse onderzoeksinstituten uit Europa vertegenwoordigd: CNES (Centre National d'Etudes Spatiales, Frankrijk), ESA (European Space Agency), INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Italië), KIT (Karlsruher Institut für Technologie, Duitsland), PSI (Paul Scherrer Institute, Zwitserland) en TNO.



Er zijn presentaties over waarom vacuüm nodig is (*why*), hoe je het voor elkaar krijgt (*how*) en hoe je controleert of het gestelde doel is behaald (*how to measure*). Binnen het science committee van de workshop zijn wij dit 'the matrix story' gaan noemen en we zijn heel tevreden dat we met onze sprekers het hele veld afdekken.

We hadden vorige maand een stand op de Precisiebeurs en daar bleek weer hoe groot het vakgebied van ultra-clean vacuüm (UCV) is. We hadden interessante gesprekken met een breed scala aan bedrijven, waarvan een flink deel aangaf te zullen inschrijven op de workshop. Dat is met name interessant vanwege de interactieve break-outsessies in het programma. Het doel van deze sessies is naast onderwerpen uitdiepen vooral ook verbindin-

gen maken en een 'share and compare' doen tussen deelnemers over issues en oplossingen in het veld van UCV – een brede deelname is dan van belang.

Naast de presentaties van de sprekers en de interactieve break-outs is er ook ruim aandacht voor ontspannende en sociale activiteiten. Dit begint op zondag 2 februari met een rondleiding door het museum van Royal Delft. Direct aansluitend hebben we een workshop Delfts blauw tegelschilderen. We sluiten de zondag af met een kleine borrel in Royal Delft. Dit programmaonderdeel is vooral bedoeld voor onze internationale bezoekers, die waarschijnlijk al op zondag aankomen.

Op maandag begint de registratie voor de deelnemers om 8 uur. Om 9 uur zal



De workshop vindt plaats in Theater De Veste in Delft.

de workshop werkelijk beginnen met een welkomstwoord en uitleg van het programma voor de komende dagen. Evenals bij de vorige update wijzen we er hier ook weer op dat VCCN op vrijdag een cursus zal geven over hoe je ervoor zorgt dat de ruimte om je ultra-schoonvacuümsysteem schoon is. Dit vormt een mooie aanvulling op het materiaal uit de workshop.

Voor de sponsoring zijn we met zes partijen rond en met drie bijna. Wij zijn deze sponsors heel dankbaar, want zonder hen zou het organiseren aanzienlijk lastiger zijn. Bij dezen dan ook de vraag of er nog lezers van dit blad zijn die willen overwegen om met hun bedrijf ook sponsor te worden van deze workshop.

De inschrijving voor de workshop is geopend. Deelname kost 600 euro excl. btw. Alles is inbegrepen, ook eten en drinken tijdens het programma, twee keer een diner en de excursie.

Informatie en inschrijving:
www.tno.to/ucv

Buiten de grenzen van ultrahoog vacuüm

Foto-elektronenspectroscopie is een krachtige techniek om de samenstelling van oppervlakken te bepalen en inzicht te krijgen in de lokale chemie van de buitenste lagen van vaste stoffen. In de 21e eeuw heeft deze techniek revolutionaire ontwikkelingen doorgemaakt, van strikt vacuümgebaseerde technologie naar methoden voor meten bij atmosferische druk, in vloeibare elektrolyten en zelfs in plasma. Creatieve experimentele benaderingen hebben de kloof tussen experiment en praktische toepassing overbrugd en de beperkingen overwonnen die voortkomen uit de sterke interactie van elektronen met gassen.

Roland Bliem

Over de auteur

Roland Bliem is groepsleider Materials and Surface Science for Extreme Ultraviolet Lithography bij ARCNL (Advanced Research Center for Nano Lithography) in Amsterdam en associate professor aan de Universiteit van Amsterdam.

www.arcnl.nl

Corrosie veroorzaakt jaarlijkse kosten van 2,2 biljoen euro (NACE (National Association of Corrosion Engineers), 2017). De productie van chemicaliën verbruikt 1,5% van de wereldwijde energieproductie. Wrijving en slijtage worden verantwoordelijk geacht voor 30% van alle energieverliezen wereldwijd. De gemeenschappelijke factor van deze processen is niet alleen hun hoge behoefte aan energie en andere hulpbronnen – in al deze processen spelen de oppervlakken van de betrokken materialen een cruciale rol. De elementaire interacties die de basis vormen van katalytische reacties, corrosie- en slijtageprocessen vinden plaats op oppervlakken, waar een materiaal in contact komt met zijn omgeving. De neiging van oppervlakteatomen

om chemische bindingen te vormen met moleculen en atomen in hun omgeving, bepaalt hoe reactief of inert een materiaal is. Dit geeft een speciale rol aan de oppervlaktesamenstelling, die enerzijds de interacties met de omgeving van een materiaal bepaalt, maar door die omgeving ook wordt beïnvloed.

De bulksamenstelling van veel materialen wordt tijdens hun synthese bepaald. De oppervlaktelaag met verschillende elementen en hun chemische toestand is echter dynamisch en afhankelijk van zowel de oppervlaktevoorbereiding als de omstandigheden waarin die wordt toegepast. Meten hoe de samenstelling van oppervlakken in verschillende omgevingen evolueert, is daarom erg belangrijk, bijvoorbeeld om te begrijpen hoe katalysatoren functioneren of hoe materialen degraderen. Idealiter worden dergelijke studies uitgevoerd in omstandigheden die zo dicht mogelijk bij de toepassing liggen.

Een manier om de samenstelling van oppervlakken te meten, is via elektronenspectroscopie. Daarbij wordt een materiaal geëxciteerd door röntgenstraling, ultraviolet (UV) licht of elektronenstralen. Het aantal elektronen dat wordt

uitgezonden van het materiaal, wordt gedetecteerd als functie van hun energie. Deze techniek maakt gebruik van twee eigenschappen van elektronen: ze interacteren sterk met materialen en hun bindingsenergie binnen atomen is elementspecifiek. In combinatie maakt dit een analyse van de materiaalsamenstelling mogelijk die alleen de buitenste paar nanometers van een vaste stof betreft.

Een korte geschiedenis

Een van de meest voorkomende methoden voor elektronenspectroscopie maakt gebruik van het foto-elektrisch effect, de emissie van elektronen uit bezette toestanden in chemische elementen bij bestraling met röntgenstralen of UV-licht. De stralingsenergie wordt overgedragen aan een elektron met een goed gedefinieerde bindingsenergie, die moet worden overwonnen voordat het elektron het atoom kan verlaten. Het uitgezonden elektron draagt de resterende energie als kinetische energie. Deze kinetische energie wordt gemeten en, samen met de bekende stralingsenergie, gebruikt voor het berekenen van de bindingsenergie van het elektron, die kenmerkend is voor het chemische element en zijn oxidatietoestand.

Het foto-elektrisch effect werd voor het eerst waargenomen door Heinrich Hertz in de vorm van een elektrische stroom die materialen verlaat nadat ze door licht zijn bestraald. De verklaring en theoretische beschrijving van het foto-elektrisch effect werd in 1905 gegeven door Albert Einstein, die hiervoor in 1921 de Nobelprijs voor Natuurkunde ontving.

Verschillende laboratoria hebben het foto-elektrisch effect in de daaropvolgende jaren onderzocht. Het duurde echter tot de jaren vijftig voordat Kai Siegbahn en zijn medewerkers in Uppsala (Zweden) een speciale spectrometer construeerden om ESCA uit te voeren. ESCA (elektronenspectroscopie voor chemische analyse) was destijds de benaming voor röntgen-foto-elektronenspectroscopie (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS). Siegbahn speelde een leidende rol in baanbrekende stappen voor de ontwikkeling van XPS. Hij rapporteerde de eerste spectra met hoge resolutie van gespleten natriumchloride- en magnesiumoxide-opppervlakken en toonde aan dat verschillende oxidatietoestanden van koperoxides resulteren in verschillende piekposities. In de daaropvolgende decennia publiceerde hij de eerste foto-elektronenspectra van moleculen in de gasfase en was hij betrokken bij de demonstratie van XPS voor vloeistoffen.

Het voorstel om XPS toe te passen op monsters voor katalyseonderzoek kwam relatief laat, in 1971. Kort daarna werd bewezen dat de oppervlaktegevoeligheid van de techniek voldoende was om verschillende oxidesoorten op katalysatoroppervlakken te onderscheiden. De toekenning van de Nobelprijs voor Natuurkunde aan Siegbahn in 1981 markeerde een nieuwe mijlpaal in de geschiedenis van de techniek. Hoewel de statische oppervlaktechemie-experimenten uitgevoerd in ultrahog vacuüm (UHV) al nuttige informatie gaven, werd al snel erkend dat experimenten tijdens blootstelling aan reactieve gasomgevingen de mogelijkheid bieden om inzicht

te krijgen in dynamische veranderingen aan oppervlakken. De eerste metingen aan vaste stoffen in gasomgevingen werden al in 1979 uitgevoerd. Maar pas in 2002 maakten de geavanceerde ontwerpen voor elektronenoptiek, ontwikkeld bij de Advanced Light Source, near-ambient-pressure XPS (NAP-XPS) tot een veelgebruikte techniek.

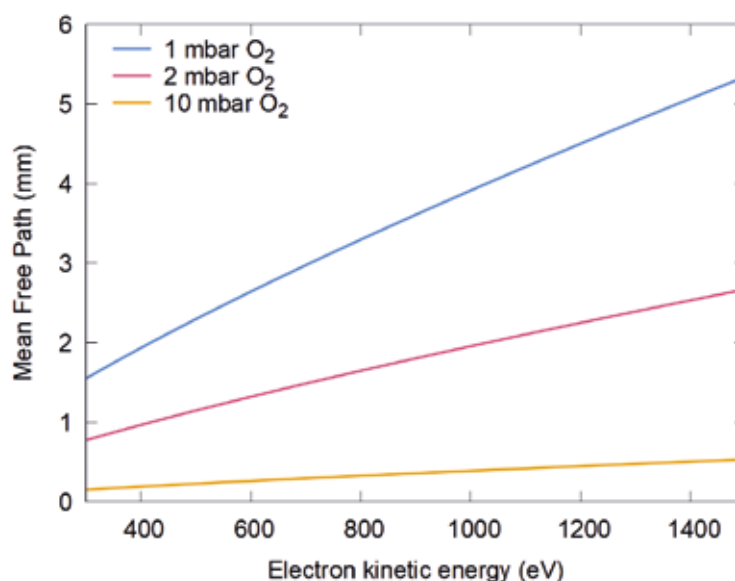
In de afgelopen twee decennia is XPS bij verhoogde drukken op meerdere manieren verder verbeterd. Dat heeft geleid tot een groter drukbereik, geoptimaliseerde ontwerpen voor elektrochemische experimenten, en ook commercieel verkrijgbare NAP-XPS-opstellingen. Dit artikel bespreekt de technologische ontwikkeling van XPS van een UHV-techniek tot een gevestigde methode om oppervlakken in gasomgeving te bestuderen. Inspiratie hiervoor kwam van de oorspronkelijke artikelen en reviews over het onderwerp [1,2,3]. De technologische vooruitgang van XPS heeft het oppervlaktewetenschappelijk onderzoek versterkt en de veelzijdigheid van de techniek vergroot. Tegenwoordig wordt die ook boven atmosferische druk toegepast voor elektrochemische experimenten in

vloeistoffen en zelfs voor in-situ studies met plasmageactiveerde moleculen.

Vacuümeisen van klassieke elektronenspectroscopie

De sterke interactie van elektronen met materie is een essentieel voordeel voor oppervlaktegevoelige experimenten. Elektronen die worden geëxciteerd op meer dan enkele nanometers tot tientallen nanometers onder het oppervlak, worden verstrooid door hun interactie met de vaste stof, waardoor hun kinetische energie verandert en dus elke element-specifieke informatie verloren gaat. Deze verstrooiing kan ook plaatsvinden in de gasfase, wat de afstand beperkt die elektronen kunnen afleggen binnen spectroscopische opstellingen.

In hoog en ultrahog vacuüm, de typische omstandigheden voor XPS, spelen botsingen met gasmoleculen een verwaarloosbare rol bij het verstoren van de weg van de elektronen. Echter, bij een druk van 1 mbar is de gemiddelde weglengte van de elektronen tussen botsingen, aangeduid als hun vrije weglengte (λ), in de orde van enkele millimeters in het relevante bereik van kinetische ener-



Figuur 1. Gemiddelde afstand tussen verstrooiingsgebeurtenissen van elektronen met zuurstofgas (vrije weglengte berekend op basis van totale verstrooiingsdoorsneden [4]). Bij een zuurstofdruk van 1 mbar legt het gemiddelde elektron met een kinetische energie van 1 keV een afstand af van ongeveer vier millimeter voordat het door een molecuul wordt verstrooid. Deze afstand neemt aanzienlijk af bij lagere kinetische energieën of hogere drukken.

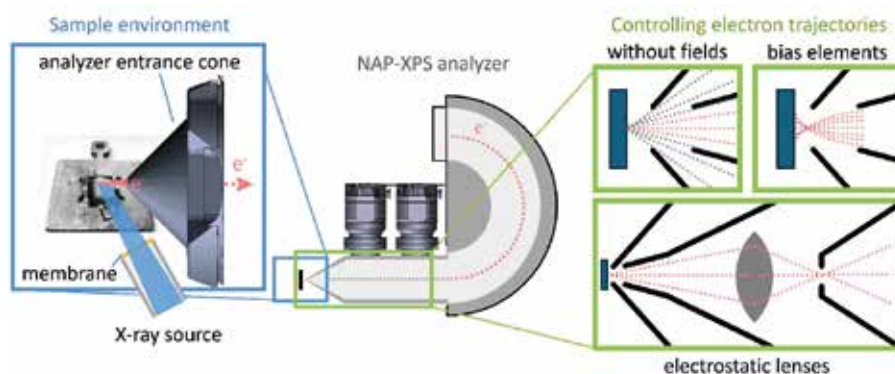
gieën. Deze vrije weglengte is nauw gerelateerd aan de gevoeligheid van een meting: het is de karakteristieke afstand van de snelle (exponentiële) afname van het aantal elektronen dat zonder verstrooiing een bepaalde afstand bereikt.

Figuur 1 illustreert de druk- en energieafhankelijke vrije weglengte van elektronen in zuurstofgas bij typische kinetische energieën voor XPS. Het is duidelijk dat de vrije weglengte van elektronen al kleiner is dan de typische afmetingen van een spectrometer bij een druk van 1 mbar. Bovendien zouden drukken in dit bereik de werking van elektronenvermenigvuldigers, zoals channel plates, en filamentgebaseerde röntgenbronnen niet toestaan. Deze drukgerelateerde uitdagingen zijn echter technisch van aard en geen fundamentele beperkingen van XPS, en kunnen worden overwonnen door geoptimaliseerde ontwerpen van experimentele opstellingen.

NAP-XPS overwint technische beperkingen

De sterke verzwakking van elektronenbundels in gas maakt het essentieel om de af te leggen afstand door gebieden met hoge druk te beperken. Dit algemene ontwerpprincipie van elektronenspectrometers voor hoge-drukwerking wordt bereikt door het monster zo dicht mogelijk bij een kleine opening te plaatsen, waardoor de elektronen een differentieel gepompte weg naar de detector volgen.

Om verdere overwegingen voor de constructie van een NAP-XPS-opstelling (Figuur 2) te begrijpen, is het nuttig om gasstroomregimes en vacuümgeneratie onder de gewenste experimentele omstandigheden nader te bekijken. De eigenschappen van het gas in specifieke drukbereiken worden bepaald door de karakteristieke afstanden van verstrooiing tussen de gasmoleculen, met name de vrije weglengte van verstrooiing van de gasmoleculen. Voor veelvoorkomende gasen zoals N_2 en O_2 is de vrije weglengte bij kamertemperatuur ongeveer



Figuur 2. Schets van een opstelling voor NAP-XPS-studies. De röntgenbron is gescheiden van de meetkamer door een dun (Si-nitride) membraan. Langs het traject van de foto-elektronen wordt de druk snel verminderd door differentieële pomptrappen, die van de meetkamer zijn gescheiden door een kleine opening. Het beperkte aantal elektronen dat de detector bereikt, kan worden vergroot door het aanbrengen van een spanning tussen de openingen van de differentieële pomptrappen en door het gebruik van elektrostatische lenzen.

0,05 mm bij 1 mbar. Als men ervan uitgaat dat zowel de grootte van de opening als de afstand tot het monster 1 mm is bij die omstandigheden, resulteert dit in een Reynolds-getal van 15, wat wijst op laminaire stroming, en een Knudsen-getal (λ_{gas}/d) van ongeveer 0,05, wat correspondeert met het Knudsen-stromingsregime. Uitspraken over de drukverdeling in dit regime vereisen numerieke oplossingen, maar ook de analyse van het moleculaire stromingsregime (van toepassing onder 0,1 mbar) kan nuttige informatie geven over de drukverdeling tussen kamers die worden gescheiden door een kleine opening.

In het regime van moleculaire stroming is de doorlaatbaarheid van de opening $C_a = A\sqrt{kT/2\pi M}$ direct gerelateerd aan het aantal botsende moleculen over het oppervlak A van de opening, waarbij M de moleculaire massa vertegenwoordigt, k de Boltzmannconstante en T de temperatuur. Voor een stikstofstroom door een opening van 0,5 mm diameter bij kamertemperatuur komt dit overeen met een doorlaatbaarheid van 0,1 l/s. Als een typische pompsnelheid van een vacuümkamer van $S = 100$ l/s wordt aangenomen, daalt de druk achter de opening p_2 met een factor van ongeveer 10^{-3} , berekend als $C_a/S = p_2/p$. Het is dus duidelijk dat er meer dan één differentieële pomptrap no-

dig is om de druk in de analysator laag te houden. De druk bij het monster wordt daarentegen bepaald door de gasstroom door de opening en de ruimtelijke drukverdeling. Op een afstand van één openingsdiameter is de druk nog steeds 95% van de druk in de kamer, terwijl de druk slechts 5% van deze druk is aan de lage-drukzijde van de opening. Het grootste deel van de verzwakking vindt dus plaats tussen het monster en de opening.

Benaderingen die uitsluitend zijn gebaseerd op differentieel gepompte volumes, verminderen al met succes de verstrooiing van de elektronen en de druk in de detector. Deze drukverbetering kent echter een hoge prijs. De kleine opening en de extra afstand tot de detector resulteren in enorme verliezen in de intensiteit van de elektronen, wat grote beperkingen oplegt aan het gebruik van zo'n opstelling. Deze beperking van de eerste ontwerpen van XPS bij verhoogde drukken werd echter beheersbaar met de introductie van elektrische potentialen voor onderdelen en elektrostatische focuslenzen in de differentieële pomptrappen. Tegenwoordig bereiken commercieel verkrijgbare analysatoren voor NAP-XPS hoge telsnelheden, terwijl monsters worden blootgesteld aan drukken in het mbar-bereik.

Voor de röntgenbron zou het gebruik van kleine openingen en differentieel pompen ook een mogelijke oplossing zijn, maar dit zou de röntgenintensiteit op het monster aanzienlijk verminderen. Een veel betere oplossing is het gebruik van vensters. Dit wordt mogelijk gemaakt door de hogere penetratiediepte van röntgenstralen in vaste stoffen: dunne membranen van mechanisch stabiele materialen, zoals silicium-nitride, worden gebruikt om de druk in de meetkamer volledig te scheiden van een apart gepompte röntgenbron.

Hoe krachtig de aanpak met kleine openingen in combinatie met differentieel pompen ook is, in de praktijk bereikt deze zijn grenzen bij enkele tientallen mbar. Bij hogere drukken zijn andere concepten vereist, waarbij er geen statische gasdruk van het procesgas heerst in de spectroscopiekamer. In plaats daarvan zijn deze concepten gebaseerd op het lokaal verhogen van de druk aan het oppervlak van het monster. Een type ontwerp dat momenteel wordt gebruikt bij synchrotronbundellijnen is het plaatsen van gerichte hogedruknozzles dicht bij het monster, wat de lokale druk kan verhogen tot boven atmosferische druk [5]. Het gebruik van harde röntgenstralen biedt toegang tot foto-elektronen met hogere kinetische energie, wat ook resulteert in een langere vrije weglengte in de gasfase. Alternatieve concepten zijn gebaseerd op een monsteromgeving die is gescheiden van de spectroscopiekamer met behulp van tweedimensionale membranen, zoals grafeen, die de elektronenbundel slechts lichtjes verzwakken. Deze membranen worden dicht bij het monster geplaatst om de gasstroom te beperken tot een dunne laag op het oppervlak.

Verder dan gasfase-experimenten

De afgelopen jaren hebben ook ontwikkelingen in elektronenspectroscopietechnologie plaatsgevonden in andere media dan gassen, variërend van vloeistofstralen tot elektrochemische reactoren in zowel stromingsprofielen als

continue onderdamping in oplossing. Recentelijk is zelfs XPS in een omgeving van plasma-geactiveerde moleculen [6] gerapporteerd, wat de strikte vereisten van UHV-materialen verder uitbreidt om de interactie met extreem reactieve soorten te kunnen weerstaan. Op het eerste gezicht lijkt de meting van elektrochemische processen die plaatsvinden aan elektroden in vloeistoffen in het bijzonder in tegenspraak met ultrahogvacuümtechnieken zoals XPS. Slim experimenteel ontwerp en de technologische ontwikkelingen van NAP-XPS zoals hierboven beschreven, zijn echter zelfs zo ver gevorderd dat er commerciële opstellingen voor XPS in vloeistoffen beschikbaar zijn gekomen.

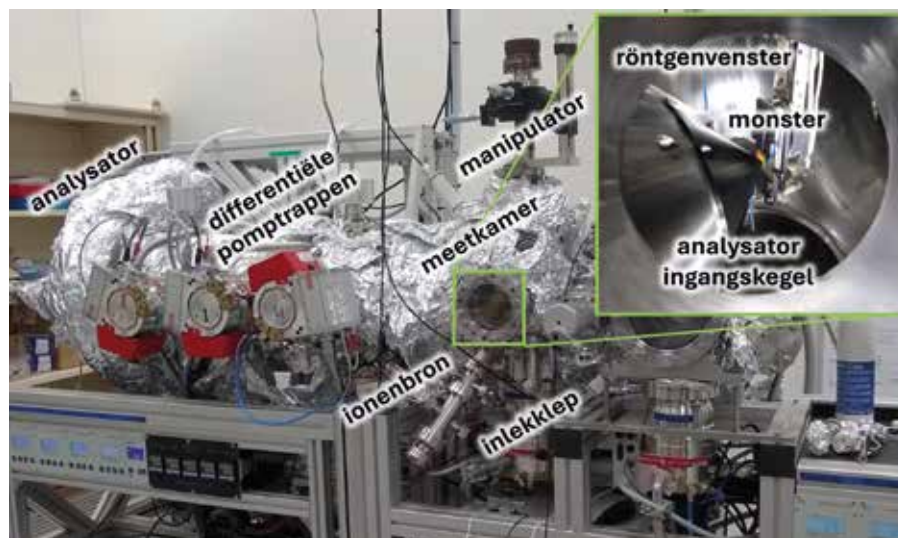
Ook hier zijn er twee belangrijke experimentele benaderingen gangbaar voor XPS-experimenten met elektrochemische processen die live in vloeistoffen worden gevolgd. Opstellingen op basis van membranen met ingewikkelde celontwerpen maken vloeistofstroming mogelijk zonder direct contact met de spectroscopiekamer. Alternatieve concepten zijn gebaseerd op open reservoirs van elektrolyt in de vacuümpostelling. Het plaatsen van een open beker met een oplossing in vacuüm kan natuurlijk eenvoudig worden bereikt met vloeistoffen met een lage dampspanning, maar de grootste interesse in de studie van elek-

trochemie ligt bij waterige oplossingen, die gemakkelijk verdampen in vacuüm. Werken bij de evenwichtsdampspanning van water (ongeveer 23 mbar bij kamertemperatuur) maakt het echter mogelijk om het waterniveau te handhaven en is haalbaar dankzij NAP-XPS-technologie.

In deze opstellingen wordt het grensvlak tussen elektrode en elektrolyt doorgaans bereikt via de zogeheten meniscus- (of 'dip-and-pull'-) methode [7], die meestal wordt uitgevoerd bij hogere röntgenenergieën (in het 'tender'-röntgenregime tussen 2 en 7 keV) om door een aanzienlijke dikte van het elektrolyt te kunnen meten. Een samenstel van werkelektrode, tegen-elektrode en referentie-elektrode wordt ondergedompeld in het elektrolyt bij de gewenste elektrochemische potentiaal. Bij het omhoogtrekken van de elektrode blijft een dunne laag elektrolyt het oppervlak bevochtigen, waardoor het op de ingestelde potentiaal blijft. Ver van het bulk-elektrolyt wordt de dunne vloeistoffilm dun genoeg voor transmissie van hoge-energie foto-elektronen, waardoor een momentopname van de oppervlaktechemie op het vast-vloeistofgrensvlak kan worden verkregen terwijl de relevante elektrochemische potentiaal wordt opgelegd.

Perspectief: steeds hogere druk?

De wetenschappelijke gemeenschap is zeer succesvol geweest in het uitbreiden



Figuur 3. XPS-opstelling bij ARCNL.

van het toepassingsgebied en het meetbereik van XPS, van ultrahoogvacuümoppervlakteonderzoek tot dynamische experimenten onder relevante omstandigheden voor katalyse, elektrochemie en plasmachemie. Hoewel de complexiteit van de opstellingen toeneemt met de toelaatbare druk, vormen de momenteel haalbare drukken geen fundamentele grens. Echter, met relevante drukken voor katalyse- en corrosie-onderzoek binnen handbereik, neemt de toegevoegde waarde van hogere lokale gas-

drukken af en ontstaan er nieuwe uitdagingen voor veelzijdige studies onder reactieve omstandigheden. Denk aan de ontwikkeling van realistische monstergeometrieën in gasfase- en vloeistofcellen, een betrouwbare beoordeling van de rol van röntgenstralen en elektronen in de experimentele waarnemingen, en de gebruiksvriendelijke bediening van gespecialiseerde elektronenspectroscopieopstellingen. Het zijn cruciale aspecten van actieve methodologische ontwikkeling en ze gaan verder dan alleen het streven naar hogere werkdrukken.

Referenties

- [1] D.F. Ogletree, *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 73, 3872 (2002).
- [2] M. Salmeron and R. Schlögl, *Surf. Sci. Rep.*, vol. 63, 169 (2008).
- [3] H. Bluhm, *J. El. Spec. Rel. Phen.*, vol. 177, 71 (2010).
- [4] L. Pielsticker, *et al.*, *Surf. Interf. Anal.*, vol. 53, 605 (2021).
- [5] P. Amann, *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 90, 103102 (2019).
- [6] S. Taylor, *et al.*, *Langmuir*, vol. 40, 13950 (2024).
- [7] S. Axnanda, *et al.*, *Scientific Reports*, vol. 5, 9788 (2015).

ACCLON

TECHNOLOGIES

Dé professional voor vacuümpompen & gloveboxen

DOOR INNOVATIE OP WEG NAAR EEN DUURZAME TOEKOMST



Persoonlijk inruilvoorstel
"Nieuw voor Oud"
Scan en lees verder



Nijverheidsweg 34 | NL-3274 KJ HEINENOORD | +31 (0) 85 273 7267 | www.acclon.nl | info@acclon.com

NNV op bezoek bij NEVAC en TNO

Begin dit jaar hebben we als bestuur contact opgenomen met de Nederlandse Natuurkundige Vereniging (NNV). Dit omdat wij als vacuümmensen natuurlijk vinden dat natuurkundig onderzoek eigenlijk niet zonder vacuümtechnologie kan, en dat dit misschien wel eens wordt vergeten. Dit is natuurlijk niet helemaal waar, maar wel een leuke, prikkelende stelling.

Na een paar gesprekken met de NNV hebben we als verenigingen het volgende gedaan. De NNV heeft een mini-themanummer gemaakt over vacuüm voor hun ledenblad, het Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde (NTvN). De drie artikelen betroffen “de diversiteit van vacuüm”, een langer stuk over de geschiedenis van vacuüm, en een artikel geschreven door Michiel van Limbeek (UT) over de cryogene uitdagingen voor de Einstein Telescope. Dit laatste artikel zal later ook in het NEVAC blad verschijnen.

Vanuit de NEVAC hebben we een mini-lezing over vacuüm gegeven bij de TU Delft. Daarna was er een rondleiding in het Van Leeuwenhoek Laboratorium van TNO ook in Delft. De lezing met rondleiding was aangekondigd in het NTvN-themanummer. Om vooral een



De rondleiding voerde bij TNO onder meer langs de EUV Beam Line 2, voor onderzoek naar vervuiliingsbeheersing.



De cover van het mini-themanummer van NTvN.

nieuw publiek te trekken, en daarmee potentieel nieuwe leden, hadden we geen aankondiging via de NEVAC-kanalen.

Rond de 25 NNV-leden kwamen op de middag af. De lezing behandelde de volgende vragen: wat is vacuüm, waarvoor wordt het gebruikt, hoe maak je het en hoe meet je het? Na deze lezing werden drie groepjes gevormd die langs drie vacuümopstellingen bij TNO werden geleid; experts gaven uitleg en beantwoordden vragen. Na de rondleiding ging de groep wat drinken, om verder te praten over het mooie vacuümvak.

Dank aan Gertie Schouten (NNV), Gesa Welker voor het regelen van de faciliteiten bij de TU Delft, en de TNO-collega's voor het geven van de rondleiding.

NEVAC-dag 23 mei 2025

Volgend jaar wordt de NEVAC-dag op vrijdag 23 mei georganiseerd bij de Universiteit Twente in Enschede. Houd de NEVAC-website in de gaten voor nieuws over de invulling van de dag.

Lekkage en speling

Meertraps Roots-vacuümpompen worden vaak gebruikt voor een breed scala aan toepassingen, variërend van wetenschappelijke instrumenten tot halfgeleiderfabricage, en met aanzienlijke uitdagingen op het gebied van verontreiniging. Het ontwerpen van vacuümpompen om te voldoen aan specifieke toepassingsbehoeften, is een uitdaging, aangezien een pomp pas een proces ziet als het ontwerp al vergevorderd is. Dit artikel presenteert methoden voor het modelleren van meertraps Roots-pompen en hun integratie in een ontwerptool die een zeer snel initieel ontwerp mogelijk maakt, naast een meer gedetailleerd ontwerp.

Michael Galtry

Over de auteur

Michael Galtry is technical manager voor Analytical Services bij VT Technology, Atlas Copco, in Burgess Hill (Verenigd Koninkrijk).

Dit artikel is mede gebaseerd op zijn presentatie tijdens de 17th European Vacuum Conference, dit voorjaar in Harrogate (VK).

www.atlascopco.com

Het toepassingsgebied van vacuümpompen is enorm, met een drukbereik van vijftien ordes van grootte en werkomgevingen variërend van ultraschoon tot extreem corrosief en potentieel explosief, tot de verwerking van vloeibare en vaste verontreinigingen. Het ontwerpen van pompen en systemen om aan de betreffende uiteenlopende vereisten te voldoen is een uitdaging, vooral omdat een pomp al ver gevorderd is in zijn ontwerp voordat hij het echte proces 'ziet' waarvoor hij is bedoeld. Een efficiënt ontwerpproces vereist vertrouwen in de prestaties van de pomp voordat deze wordt gebouwd, en dat kan alleen worden verkregen door modellering, steeds vaker in combinatie met optimalisatietechnieken.

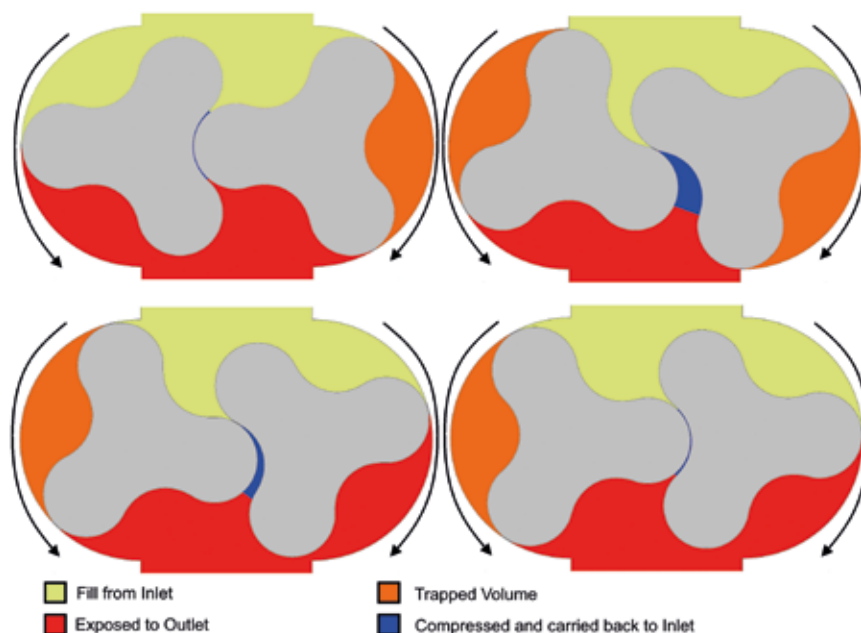
Dit artikel beschouwt de modelleringsprocessen achter een specifiek pompmechanisme, de meertraps Roots-pomp. De methoden zijn echter al toegepast op bijna alle pompmechanismen, inclusief split-flow turbomoleculaire pompen, Roots-klauwenpompen en schroef- en scrollpompen.

Roots-mechanisme

Het Roots-mechanisme is een droog vacuümpompmechanisme, dat wil zeggen

dat er geen olieafdichting is tussen bewegende en stilstaande delen; afdichting wordt bereikt door nauwe spelingen te hanteren. Figuur 1 toont de cyclus van een Roots-pomp, waarbij gas wordt opgesloten in de ruimte tussen de lobben en de stator en wordt verplaatst naar de uitlaat, waar het niet kan terugstromen tussen de in elkaar grijpende rotoren, en dus wordt afgevoerd via de uitlaatpoort.

Het mechanisme is niet erg tolerant voor verkeerde hoekuitlijning. Een kleine af-



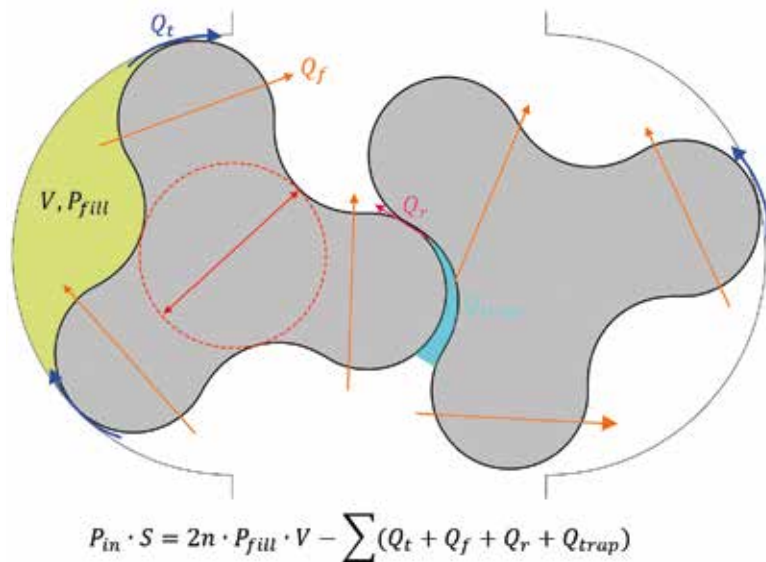
Figuur 1. De Roots-pumpcyclus.

wijking betekent al dat de rotors tegen elkaar botsen, dus worden distributietandwielen buiten het slagvolume gebruikt, waar kan worden voorkomen dat smering het vacuüm verontreinigt. Aanvankelijk werd dit mechanisme gebruikt als booster, een enkelvoudige hogecapaciteitspomp bovenop een andere voorpomp om de pompsnelheid van de combinatie bij lagere drukken aanzienlijk te verhogen, of als een eerste trap in een Roots-klauwenpomp, omdat het te moeilijk was om de uitlijning te behouden van twee Roots-trappen op dezelfde as. Met de vooruitgang in bewerkingstechnologie werd het mogelijk om rotors te maken met meerdere Roots-trappen, vaak met verschillende profielen op een enkele as. Zo werd de meertraps Roots-pomp realiseerbaar.

Nu wordt het mechanisme gebruikt in een breed scala aan droge pomptoepassingen, waaronder halfgeleiderprocespompen en wetenschappelijke vacuümtoepassingen. De Edwards iXM1200, een 'all-Roots'-systeem bestaande uit een enkelvoudige booster en een 7-traps voorpomp, is afgebeeld in Figuur 2. Dit systeem wordt gebruikt voor halfgeleiderprocessen met gemiddelde belasting,



Figuur 2. Een meertraps Roots-pomp in combinatie met een Roots-booster.



Figuur 3. Roots-profiel en lekkages.

waarbij het pompen van vast condensaat uit procesbijproducten noodzakelijk is.

Een Roots-pomp die pompt van 1 atmosfeer tot 10^{-2} mbar heeft doorgaans zes of zeven trappen, hetzij in een enkel pomphuis of in twee behuizingen in serie. Rotorprofielen kunnen variëren tussen de trappen, doorgaans met een toenemend aantal lobben per trap in opvolgende trappen, maar dit hoeft niet het geval te zijn. De trapcapaciteit kan worden geregeld door de axiale lengte, het aantal lobben en de breedte van de profieltaille; zie Figuur 3.

Roots-prestatiemodellering

De volumetrische prestatie, de berekening van de pompsnelheid van een trap, wordt al sinds het begin van de jaren 80 onderzocht [1] en is sindsdien voortdurend verbeterd. Het basisprincipe blijft ongewijzigd: het balanceren van de voorwaartse stroming door het slagvolume met de lekkage over de tipafdichtingen, door de rotor-rotorspel, en onder de lobben van de rotor aan de uiteinden. Daarbij fungeert de compressie van een klein volume uitlaatgas en de terugkeer daarvan naar de inlaatzijde terwijl de lob van de ene rotor in de taille van de andere grijpt, als een kleine pomp die van uitlaat naar inlaat werkt. Deze methoden worden al jaren succesvol gebruikt voor boosters in de PumpCalc vacuümsimu-

latiessoftware van Edwards, maar voor de trappen van een meertrapspomp gelden andere overwegingen:

1. Boosters hebben meestal twee lobben, terwijl veel meertrapspompen een groter aantal lobben hebben, wat betekent dat de lekkageberekeningen opnieuw moeten worden bekeken.
2. Boosters zijn over het algemeen axiaal langer dan afzonderlijke trappen van een pomp en daarom zijn de eindvlaklekkages minder significant in vergelijking met de andere lekkages, maar cruciaal voor dunne uitlaattrappen. Deze lekkages zijn het moeilijkst te modelleren.

Het stroomverbruik van pompen is altijd een belangrijke overweging geweest en krijgt steeds meer aandacht: het stroomverbruik tijdens gebruik is verreweg het meest dominante deel van de CO₂-voetafdruk van een pomp. Het is dus net zo belangrijk om het stroomverbruik te kunnen bepalen als de pompsnelheid, en om hierop te optimaliseren. Voor een verdringerpomp wordt het werk dat wordt verricht op het gas in een Roots-trap berekend als $W = F \cdot V_s \cdot \Delta P$. Hier is F de rotatiefrequentie, V_s het slagvolume van de trap, een geometrische parameter, en ΔP is de drukstijging over de trap, nadat de verliezen van de inlaat- en uitlaattoort zijn meegenomen.

Uitlaattrappen ondergaan de grootste drukverschillen en zijn daarom meestal kleiner (en hebben inderdaad een kleiner slagvolume nodig dan inlaattrappen, omdat ze voornamelijk dezelfde hoeveelheid gas bij een hogere druk pompen). Het minimaliseren van de afmeting van de uitlaattrap betekent dat er overcompressie van gas boven de atmosferische druk is bij hogere inlaatdrukken, wat resulteert in grote drukverschillen over de grotere trappen in het midden van de pomp. Dit effect kan worden verminderd met afblaaskleppen of door de pomp bij hogere drukken te vertragen.

Modellering van pompsystemen

Een ander meertrapsfenomeen dat niet aanwezig is in boosters, is lekkage tussen de trappen. Het eenvoudigweg in serie plaatsen van boostermodellen zal de modelprestaties daarom niet adequaat bepalen. Dit wordt belangrijker naarmate pompen op hogere snelheden draaien en kleiner worden, omdat de speling niet schaalbaar met de fysieke grootte van de pomp. Lekkage tussen de trappen langs de as kan zeer aanzienlijk zijn, omdat het van de uitlaat van een trap langs de as naar de inlaat van de vorige trap kan gaan, waardoor twee trappen effectief

worden omzeild. Voorspelling en beheersing van deze lekkages is daarom essentieel.

De pomp moet daarom worden gemodelleerd als een vacuümsysteem als geheel, in plaats van sequentieel in trappen. Dit kan worden bereikt met behulp van een netwerkmodelleringstool die vergelijkbaar is met die gebruikt wordt in Edwards' PumpCalc en TransCalc modelleringstools voor vacuümsystemen. Deze tools zijn met succes gebruikt in een heel scala aan complexe vacuümtoepassingen, van centraalvacuümsystemen tot versnellers, EUV-lithografiesystemen en massaspectrometertoepassingen (zie Figuur 4). In dergelijke systemen wordt een reeks knooppunten, waar de druk wordt berekend, verbonden door een netwerk van leidingen, pompen en toegevoegde stromen, die reinigungsstappen en processtroom vertegenwoordigen. Stroming door leidingen kan snel worden berekend over het hele drukbereik, met behulp van 1D modellen voor continue stroming, bekende methoden voor moleculaire stroming en mengvormen voor het overgangsgebied [2][3]. Grote systemen met honderden componenten kunnen worden doorgeredend met be-

hulp van deze methoden. Het probleem wordt dan gereduceerd tot het kiezen van een geschikt netwerk om lekkage tussen de trappen te modelleren en de speling te berekenen voor een draaiende pomp.

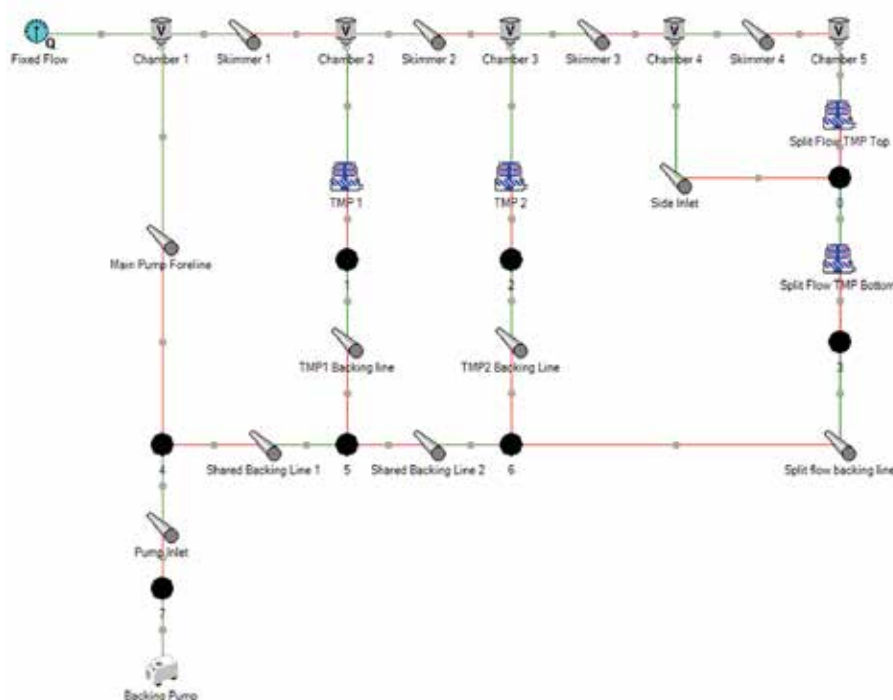
Aslekkage

Een model voor aslekkage moet de lekkage onder de taille van de rotoren, over een trap en in de asspeling vastleggen, net als de lekkage langs de as tussen de trappen. Dit bleek een van de grootste uitdagingen te zijn. De eerste benadering van lekkage op de rotortaille naar de as voor de trap had de benodigde connectiviteit om een gasstroom tussen een willekeurige inlaat en uitlaat mogelijk te maken (Figuur 5a).

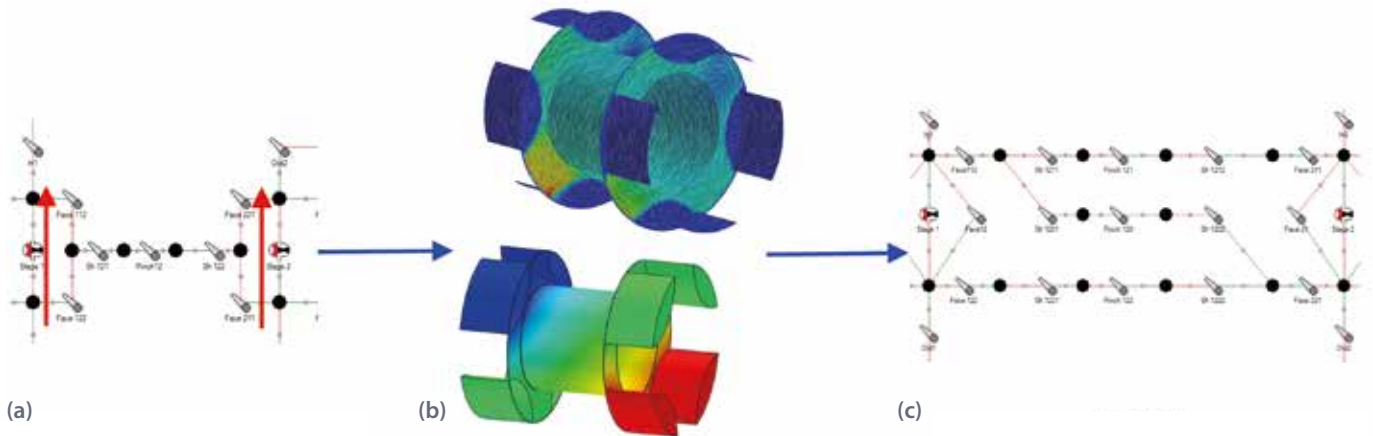
Het bleek echter dat als de eindvlaklekkages voldoende waren om merkbare lekkage tussen de trappen te veroorzaken, ze ook groot genoeg waren om een grote lekkage tussen uitlaat en inlaat van een trap te veroorzaken, wat betekende dat de prestaties van de trap buitensporig werden beïnvloed. Om dit te verhelpen, werden een aantal tussentrapasgeometrieën geanalyseerd met behulp van Computational Fluid Dynamics (CFD); Figuur 5b toont een case met lekkage tussen twee vierlobbige trappen. Vervolgens werd multivariate optimalisatie gebruikt om de beste geometrie te verkrijgen voor een aangepast netwerkdiagram (Figuur 5c). De tweede kruislekkage was niet nodig, aangezien trap 2 inlaat en trap 1 uitlaat een vergelijkbare druk zouden moeten hebben als het gaspad tussen de trappen goed is ontworpen. Deze aangepaste aslekkage-modellering gaf uitstekende resultaten.

Modellering van speling

De prestaties van de Roots-trappen en de hoeveelheid lekkage zijn sterk afhankelijk van de spelingen in de pomp. Deze zijn op hun beurt afhankelijk van de temperatuur van de rotor en stator voor elke trap en van de kopplaten aan elk uiteinde van de pomp. Het berekenen van de axiale spelingen in de pomp is een gedetailleerde,



Figuur 4. TransCalc-netwerk voor een massaspectrometer.



Figuur 5. Ontwikkeling van een tussentrapaslekkagemodel.

(a) Eerste poging: lekkage over trappen heen domineert lekkage langs de as.

(b) CFD en moleculaire stromingsmodellering van stroming langs de as over een breed bereik van druk en geometrie.

(c) Eindsysteem: complexer netwerk equivalent aan een CFD-model.

maar in principe eenvoudige, expansieberekening voor rotor en stator vanaf een vaste lagerlocatie. Deze spelingen zijn cruciaal voor lekkage tussen de trappen en voor de prestaties van de uitlaattrappen, waarbij de eindvlakspeling een groter aandeel in de totale lekkage heeft. De berekening van de radiale spelingen in de afzonderlijke trappen is complexer. Deze berekening vereist a priori kennis van de temperaturen, die zullen veranderen naarmate de belasting op de pomp verandert. Een compleet model zou temperaturen en spelingen samen berekenen, maar de eerste stap, hier gepresenteerd, is om goede prestatievoorspellingen te demonstreren voor bekende omstandigheden.

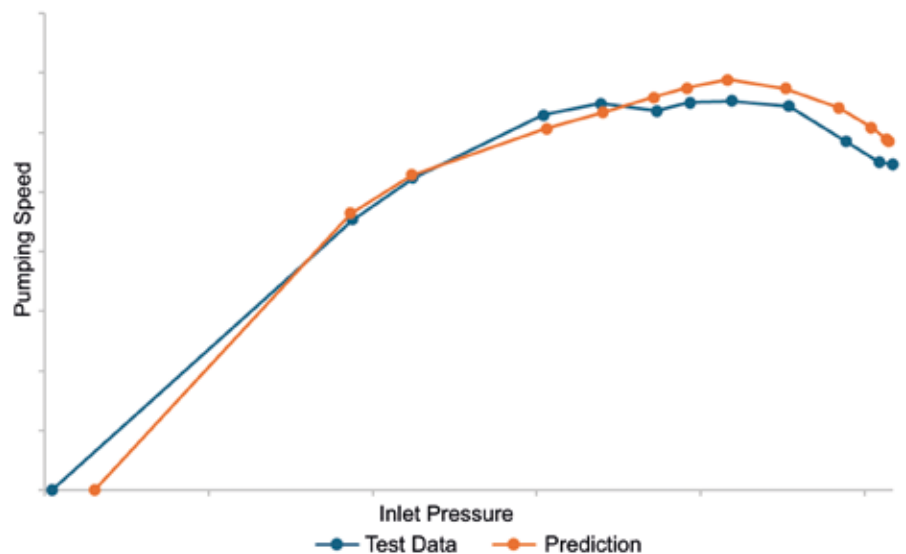
Validatie

Pompsnelheidscurven, het volumetrische debiet bij de inlaat uitgezet tegen de inlaatdruk, en ingangsvermogenscurven zijn de meest voorkomende vormen van gemeten pompprestaties. Ze kunnen snel worden gereproduceerd met behulp van het model. De hoogste nauwkeurigheid wordt bereikt met de nauwkeurigste rotor- en statortemperatuurverdeling bij elke conditie, maar dit wordt in feite slechts gemeten voor relatief weinig bedrijfspunten. De temperaturen kunnen voor deze punten worden gedefinieerd en geïnterpoleerd voor drukken ertussenin en geëxtrapoleerd als constante waarden buiten het gemeten bereik. Pompsnel-

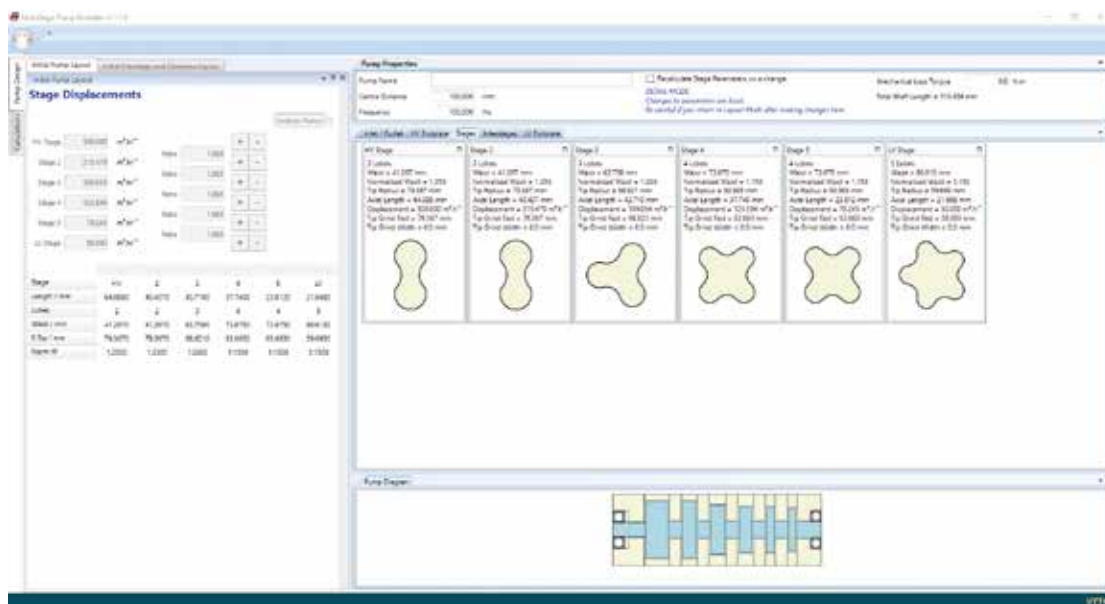
heidscurven kunnen met behulp van het model in minder dan een minuut worden gegenereerd op een standaardlaptop. Deze berekeningen geven ook tussentrapsdrukken, cruciaal voor vermogensberekeningen en evaluatie van toepassingen, waarbij partiële drukken van condenseerbare dampen en corrosieve gassen belangrijk zijn.

Een vergelijking voor validatie van een pomp wordt weergegeven in Figuur 6. De waarden voor deze pomp in ontwikkeling zijn geschaald en details zijn verwijderd, maar dit is een echte weerspiegeling van de nauwkeurigheid van de voorspellingen. De einddruk, de druk

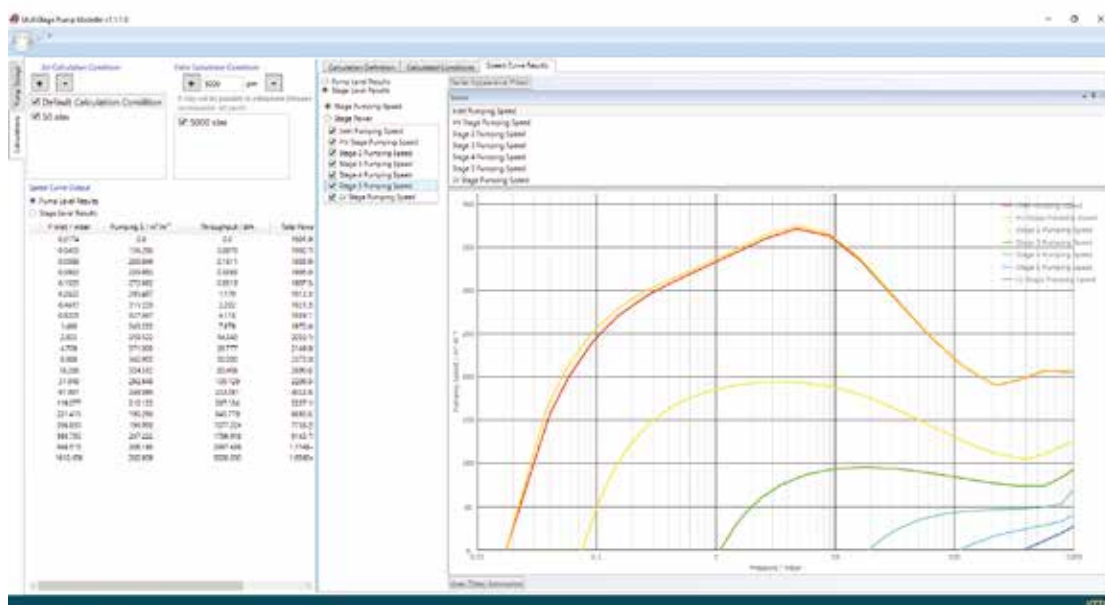
waarbij de pompsnelheid daalt tot nul, kan niet met zeer hoge precisie worden voorspeld. Hoewel de einddrukmeting nauwkeuriger zou moeten zijn, alleen afhankelijk van meetfouten in druk, en niet van druk en inlaatstroom, wordt deze sterk beïnvloed door precieze waarden van de spelingen en ook van de spoelstromen naar het inlaat-uiteinde van de pomp. De exacte waarde van de berekende einddruk is in feite het punt waar een groot lek precies een grote voorwaartse verplaatsing tenietdoet en is zeer gevoelig voor kleine veranderingen. De mate van nauwkeurigheid die hier wordt gevonden, is acceptabel als onderdeel van het ontwerpproces.



Figuur 6. Vergelijking tussen pompsnelheidsvoorspelling en -meting voor een experimentele pomp.



Demo pump designed and modelled in < 5 minutes



Figuur 7. De ontwerp tool met een meertraps Roots-ontwerp.

Vermogensvoorspellingen zijn goed bij lage rotatiesnelheden, maar worden minder nauwkeurig bij hogere snelheden en drukken. Het mechanisme voor deze afwijking van de standaard vermogensberekening wordt onderzocht. De nauwkeurigheid over het drukbereik is gereproduceerd voor zeer verschillende pompontwerpen, wat betekent dat deze modellering een waardevolle ontwerp-tool is.

Uitbreiding naar meerdere gassoorten

Voor zwaardere gassen kan een mengsel van gassen worden behandeld als één enkel gas met gemengde eigenschappen zonder veel nauwkeurigheid te verliezen. Zelfs met deze aanname moet er meer zorg worden besteed aan een nauwkeurige berekening van partiële drukken in een gasgespoelde pomp. Voor lichte gassen, waterstof en helium, is de verandering in samenstelling van het gasmengsel dat door de pomp gaat een

essentieel onderdeel van de prestatieberekening. Die kan worden bepaald door een gekoppelde oplossing voor elke gassoort. Daarbij kan drukgestuurde advectie (het meevoeren van lichte gassen met de spoelstroming) door buizen en spelingen worden behandeld als een mengsel in viskeuze stroming, dat overgaat in partiële drukgebaseerde stromingen voor afzonderlijke gassoorten in moleculaire stroming.

Diffusie kan ook worden verwerkt in de stationaire toestand, maar bleek de berekeningen aanzienlijk te vertragen. Daarbij zijn de drukverschillen die in pompen worden gezien zodanig groot dat diffusie verwaarloosbaar is in vergelijking met advectie. Terugstroming en menging in de Roots-trappen zijn moeilijker te berekenen.

Rotor- en statortemperaturen voor pompen met grote stromen waterstof of helium verschillen sterk van vergelijkbare gevallen bij zwaardere gassen, vanwege de zeer hoge thermische geleidbaarheid van de lichte gassen. Daarom is het noodzakelijk hier een goed begrip van te hebben om adequate prestatiecurven voor lichte gassen te produceren. Het veel grotere model dat nodig is om meerdere gassoorten te verwerken, convergeert aanzienlijk langzamer, maar levert zeer goede resultaten op.

Pompontwerpproces

Het ontwerpproces begint met het beschouwen van de volledige bedrijfscyclus van de pomp. Zelfs een pomp die is ontworpen voor load-lock-toepassingen, die zo snel mogelijk van atmosferisch naar een basisdruk als doel pompt, zal waarschijnlijk het grootste deel van de tijd tegen de einddruk aan pompen, wat betekent dat er een balans moet worden gevonden tussen prestaties en efficiëntie bij hoge druk en efficiëntie bij de einddruk. De keuze van de relatieve capaciteiten van de trappen in de pomp, de trapverhoudingen, is een cruciaal startpunt voor het ontwerp en de verhoudingen zullen voor verschillende toepassingen verschillen.

Zodra de verhoudingen zijn bepaald, volgt het trapontwerp in termen van de selectie van het rotorprofiel: een kleine uitlaattrap kan een zeer kleine axiale lengte hebben met één profiel, waardoor lekkage aan het oppervlak zeer significant is en warmteafvoer uit die trap moeilijk is. Verschillende profielen kunnen dit probleem aanpakken, maar er is een optimum nodig om ervoor te zorgen dat de resulterende pomp niet te veel ruimte inneemt. Het profielontwerp wordt ook beïnvloed door maakbaarheid en kosten.

Spelingen vergen normaal gesproken gedetailleerd ontwerp, maar het is handig om een snelle schatting te hebben van de koude spelingen die nodig zijn om de gewenste warme spelingen te produceren. Om deze en de andere ontwerpoverwegingen aan te pakken, is het model geïntegreerd in een pompontwerptool, waarbij trapgroottes worden ingevoerd als target. Wijzigingen in parameters, zoals het aantal lobben, de taille en de axiale lengte, resulteren in het opnieuw berekenen van de andere parameters om de vereiste grootte te bereiken. Een target voor de warme speling, met lineaire uitzettingscoëfficiënten, moet worden gegeven, evenals een ontwerp temperatuurprofiel, dat de meest uitdagende conditie voor spelingen weergeeft. Hieruit kun-

nen koude spelingen worden berekend om het target voor de warme speling bij deze conditie te bereiken. De ontwerp-tool is weergegeven in Figuur 7.

Het eerste ontwerp van een pomp gebeurt daarom in een zeer snel proces en de belangrijkste kenmerken van de pomp worden gevisualiseerd, zodat de gebruiker invoerfouten gemakkelijk kan opsporen. De zestraps demopomp, zoals afgebeeld in Figuur 7, is vanaf nul ontworpen en letterlijk in vijf minuten gemodelleerd. Deze pomp is opzettelijk niet goed ontworpen, maar de kracht van de tool is duidelijk. Zodra de layout, waarbij wijzigingen in parameters resulteren in herberekening om targets te halen, is voltooid, kan de gebruiker naar de gedetailleerde ontwerpmodus gaan, waarin individuele parameters kunnen worden ingesteld zonder dat dit tot herberekening leidt.

Het initiële model kan vervolgens worden opgeslagen en gebruikt als basis voor geautomatiseerde optimalisatiestudies, waardoor snel het eerste ontwerp van pompen voor een breed scala aan formaten en toepassingen mogelijk is.

Conclusie

De meertraps Roots-modelleringstool bouwt voort op Roots-modellerings technieken die in de loop der jaren zijn ontwikkeld en succesvol zijn gebruikt in Edwards' modelleringstools voor vacuumsysteem. De nieuwe tool is specifiek uitgebreid voor meertraps pomptoepassingen in plaats van enkeltraps boosters. De toevoeging van tussentraps aslekken maakt gebruik van zeer succesvolle netwerkmodelleringsmethoden die effectief zijn gebleken in vacuümsystemen voor het volledige scala aan toepassingen en drukken. Deze methode is uitgebreid om meerdere gassoorten te verwerken en de evolutie van de gassamenstelling door de pomp heen te modelleren. Om de tussentraps modellering te verfijnen, is CFD gebruikt om de netwerkweergave van het tussentraps lekpad te optimaliseren.

Het model wordt in twee vormen gebruikt. Een pompontwerptool maakt snelle ontwikkeling en modellering van een basisontwerp mogelijk, waarbij ontwerpregels worden gebruikt om de gebruiker te begeleiden, maar deze regels kunnen ook worden genegeerd. Een batchtool kan worden gecombineerd met optimalisatietools. De nieuwe tool is daarom een essentieel onderdeel geworden van het pompontwerpproces. Het verkort de tijd en kosten van de ontwikkeling van nieuwe producten aanzienlijk en maakt een snelle ontwikkeling van innovatieve ontwerpen mogelijk.

Referenties

- [1] Livesey, R.G., & Budgen, L.J. (1982), "Computation of the performance of mechanical boosters with various fore pumps", *J. Vac. Sci. Technol. A*, 20, pp. 1014-1017.
- [2] Livesey, R.G. (2001), "Method for calculation of gas flow in the whole pressure regime through ducts of any length", *J. Vac. Sci. Technol. A*, 19, pp. 1674-1678.
- [3] Livesey, R.G. (2004), "Solution methods for gas flow in ducts through the whole pressure regime", *Vacuum*, 76 (1), pp. 101-107.

Kevin Batenburg (Universiteit Twente)

“Ik merkte hoe een vacuüm kan ‘leven’”

Hoewel hij zich had ingeschreven voor de cursus Elementaire Vacuümtechniek (EVT), besloot Kevin Batenburg in de loop van vorig academiejahr om het examen Vacuümtechniek (VT) af te leggen. Hij slaagde glansrijk: met 9,5 behaalde hij het beste resultaat. Batenburg verdient zijn brood als procestechnoloog aan de Universiteit Twente, waar hij deel uitmaakt van de onderzoeksgroep Integrated Devices and Systems. In de cleanroom werkt hij bijna dagelijks met vacuüms, bijvoorbeeld als hij halfgeleiders ‘coat’ met laagjes materiaal van slechts enkele nanometers dik.

Senne Starckx

Om de job van je leven te vinden, hoef je niet noodzakelijk een Ph.D. bezitten. Zelfs een masteropleiding is geen absolute vereiste. Kevin Batenburg (35) had aan een bachelor Technische Natuurkunde genoeg. Zeven jaar geleden begon hij als procestechnoloog aan de Universiteit Twente. “Oorspronkelijk was het wel de bedoeling dat ik na mijn bachelor nog een masteropleiding zou doen. Maar toen was er hier opeens een vacature. Ik wist wat de job inhield, ook al had ik mijn afstudeerwerk en stage bij een andere vakgroep van de universiteit gedaan. Nadat ik was aangenomen beviel het werk me zo goed dat ik mijn ambitie om een master te behalen in de koelkast te stopte. Een masteropleiding doe je om een leuke baan te vinden, maar die had ik dus al”

Materiaalonderzoek

Batenburg is verbonden aan zowel de onderzoeksgroep Integrated Devices and Systems (IDS), waarvoor hij het grootste deel van zijn tijd werkt, als het MESA+ Institute, het nanotechnologielaboratorium van de Twentse universiteit. In de IDS-

groep draait alles rond elektronica: transistors, diodes, zonnecellen, sensoren, ... Elektronische devices worden er ontworpen, gemaakt en uitgetest. De fabricage gebeurt onder meer op basis van state-of-the-art materiaalonderzoek, een sterkte van de groep.

Atoomlaagdepositie

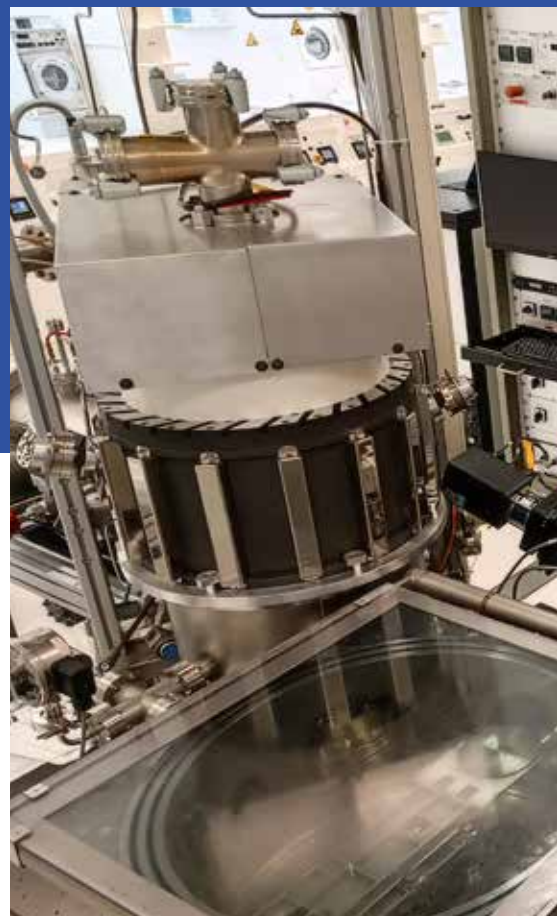
De procestechnoloog is vooral actief in projectonderzoek, meestal gefinancierd door NWO. Vaak gaat het om onderzoek aan halfgeleiders, de basis van computerchips. “We bestuderen nieuwe halfgeleider technieken, op het vlak van zowel fabricage als prestaties. Maar we kijken bijvoorbeeld ook hoe halfgeleidercomponenten beter kunnen worden ingepast in devices zoals zonnecellen.” Dat onderzoek gebeurt in een cleanroom, en vaak komen er vacuümomgevingen aan te pas. Die zijn bijvoorbeeld nodig om extreem dunne coatings aan te kunnen brengen op substraten. “Via de techniek van atoomlaagdepositie (ALD) groeien we laagjes materiaal van slechts enkele nanometers dik. Dat kan alleen onder vacuüm.” Het

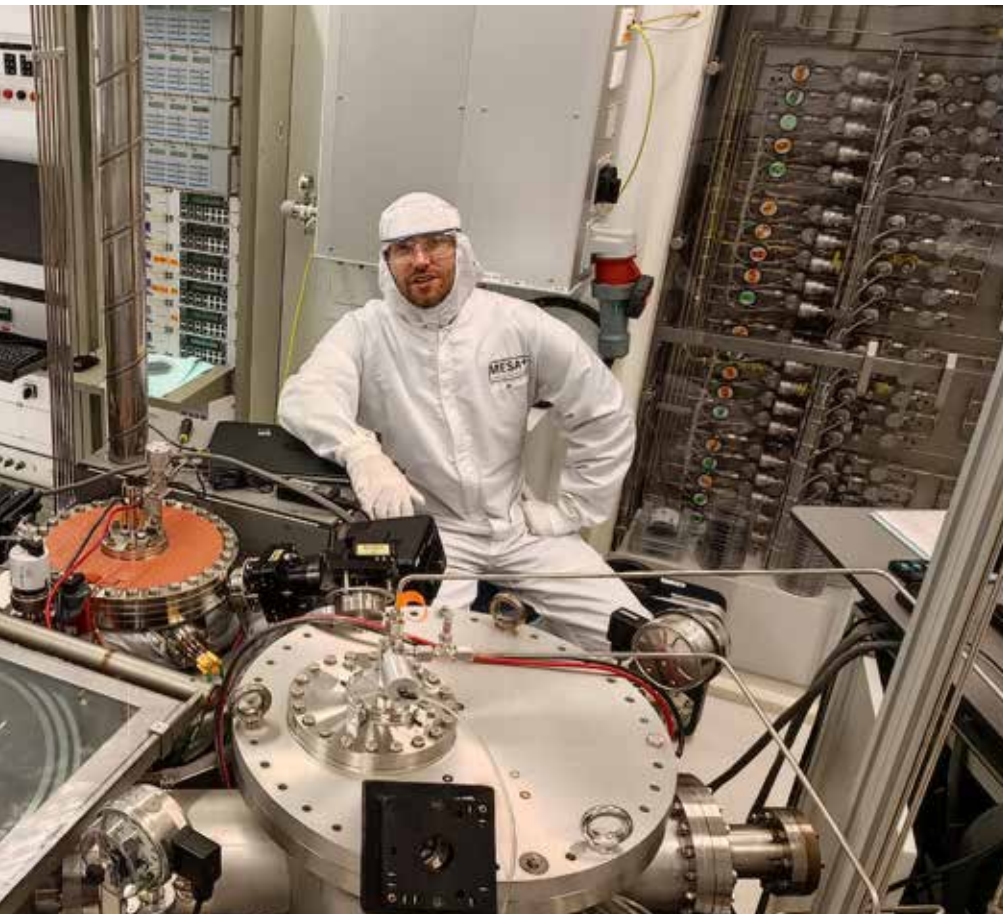
luchtledig maken van de reactoren waarin ALD plaatsvindt, duurt overigens wel even. “Doorgaans plaats ik een te behandelen sample er de avond voordien al in, waarna ik het onder vacuüm zet. Dan kan ik de volgende dag meteen beginnen.”

Plug-and-play

Het werk in de IDS-groep gebeurt met hightech apparatuur. Een prominente rol speelt het zogeheten clustersysteem. Dat heeft een centraal gedeelte met meerdere openingen, waaraan telkens een andere reactor kan worden geplaatst. Dankzij het plug-and-play karakter kan het systeem zo voor verschillende projecten worden ingezet. Het is ook in deze reactoren dat de ALD plaatsvindt. “Tijdens de groei van de laagjes materiaal kunnen we de omstandigheden in de reactor (zoals temperatuur en druk) variëren om te kijken wat voor invloed dat heeft.”

Het clustersysteem werd door de vakgroep zelf ontworpen en gebouwd. “Je kunt je onderzoeksapparatuur natuurlijk ook bij een externe partij bestellen, maar commerciële systemen laten nu eenmaal





Kevin Batenburg bij het clustersysteem dat de Twentse onderzoeksgroep Integrated Devices and Systems heeft gebouwd: "Door een systeem zelf te maken heb je meer vrijheid, al moet je natuurlijk wel goed weten wat je aan het doen bent". (Foto: Kees van der Zouw)

minder experimenteren toe. Ze hebben bijvoorbeeld interne restricties omwille van de veiligheid. Door een systeem zelf te maken heb je meer vrijheid, al moet je natuurlijk wel goed weten wat je aan het doen bent."

Conventionele vacuümtechnologie

De in de reactoren gebruikte vacuüms zijn hoog, maar niet extreem hoog. "We zitten meestal daartussen, rond 10^{-7} en 10^{-8} millibar. De vacuümtechnologie die we daarvoor gebruiken is vrij conventioneel: voerpompen, turbopompen, kleppen, ..." Batenburg kwam tijdens zijn bacheloropleiding al in contact met vacuümtechnologie, al werd er toen niet erg diep op ingegaan. "We leerden bijvoorbeeld hoe de druk over de tijd verandert, wat een voorvacuüm is, hoe een turbopomp werkt, ..., maar daar bleef het zowat bij. Toen ik hier begon te werken, wist ik al van het bestaan van de NEVAC-cursus af. Ik wist dat ik 'm ooit zou gaan volgen."

Puzzelstukjes

Batenburg begon uiteindelijk in september 2023 aan de cursus Elementaire Vacuumtechniek – al besloot hij gedurende de cursus om het examen Vacuumtechniek te doen; die keuzemogelijkheid hebben de cursisten. Waarom begon hij niet eerder aan de cursus? "Tijdens mijn eerste jaren heb ik me hier helemaal verdiept in de halfgeleiderdtechnologie. Die wilde ik eerst goed onder de knie hebben, voordat ik mijn kennis in een ander domein zou gaan bijspijken. Vorig jaar was die mentale ruimte er." Nu is hij dus ook thuis in de vacuümtechnologie. "Tijdens de cursus werden veel vragen die ik over vacuüm had, beantwoord. De puzzelstukjes vielen in elkaar. Vandaag merk ik dat vacuüm eigenlijk datgene is wat alle onderzoeksapparatuur en -systemen die we hier gebruiken, met elkaar gemeen hebben."

Onverwachte drukverhoging

Een van de vragen waarmee Batenburg zat, was wat een perfect vacuüm is. "Ik be-

grijp nu dat dat een relatief begrip is. Het hangt ervan af waarvoor je het vacuüm gebruikt. Voldoet een vacuüm bij een specifieke toepassing, dan is het perfect." Meer praktisch leerde hij dat een onverwachte drukverhoging in een vacuümruimte niet noodzakelijk betekent dat er een lek is. "Ik stond ervan versteld hoe er in een op het eerste gezicht lege ruimte toch nog ontgassing kan plaatsvinden, uit aanwezige materialen. Tijdens de cursus merkte ik hoezeer een vacuüm kan 'leven'."

Meer theoretische diepgang gewenst

Wel vindt Batenburg dat de cursus op sommige vlakken wat theoretische diepgang miste. "Op het gebied van vacuümberekeningen, bijvoorbeeld, bleef ik een beetje op mijn honger zitten. We rekenden met de dimensies van een reactor, met de capaciteiten van pompen, enzovoort. Op een bepaald moment werd ons gevraagd de druk in een reactor van verschillende afmetingen te berekenen. Daarbij moesten we uitdrukkelijk geen rekening houden met waar de druk werd gemeten. Dat laatste vond ik jammer, de vraag werd wat gemakkelijker, maar ik wilde eigenlijk wel weten wat de invloed is van hoe en waar je precies meet."

Werken in kleinere teams

De Twentenaar kon het appreciëren dat de cursusdocenten helemaal naar Enschede kwamen afgezaakt. Logistiek was dat de meest logische oplossing, want behalve Batenburg kwamen nog vijf andere cursisten uit de streek. Aan die regio lijkt de procestechnoloog verknocht. Met zijn expertise zou hij bijvoorbeeld ook aan de slag kunnen bij een grote wereldspeler als ASML. Maar Veldhoven vindt hij te ver, en bovendien houdt hij ervan om in kleinere teams te werken. Eveneens is het fijn om zo nu en dan een student te begeleiden – het voordeel van aan een universiteit werken. Ook al heeft die student misschien een hoger diploma dan hijzelf.

www.utwente.nl/ids

Pfeiffer breidt in Benelux uit met nieuwe cleanroom

Op de vestiging in Culemborg vierde Pfeiffer Vacuum+Fab Solutions, onderdeel van de wereldwijde Busch Group, de opening van een uitbreiding van het gebouw en de ingebruikname van een nieuwe cleanroom.

Het duurde acht maanden om de uitbreiding van 1.000 m² te realiseren. Op de eerste verdieping werden nieuwe kantoren ingericht. Op de begane grond van het nieuwe gebouw bevindt zich nu een cleanroom van 350 m², verdeeld in drie ruimtes: twee van ISO-klasse 7 en één van ISO-klasse 6. Deze wordt voornamelijk gebruikt voor het onderhoud van lekdetectors die door grote halfgeleiderklanten worden gebruikt bij de productie van microchips.

“De halfgeleiderindustrie groeit gestaag en bedient veel belangrijke markten, van computertechnologie tot smartphones

en de automobielenindustrie. Dit maakt het erg belangrijk voor Pfeiffer. De nieuwe cleanroom is uitstekend geschikt om te voldoen aan de strenge eisen van de halfgeleiderklanten van Pfeiffer”, benadrukt Kaya Busch, mede-eigenaar en mede-CEO van de Busch Group.

De Busch Group is een van 's werelds

grootste fabrikanten van vacuümpompen, vacuümsystemen, blowers, compressoren en gasreductiesystemen. Onder haar paraplu huisvest de groep drie bekende merken: Busch Vacuum Solutions, Pfeiffer Vacuum+Fab Solutions en centrotherm clean solutions.

www.buschvacuum.com



Er werd een lint doorgesneden om het nieuwe pand te openen. Van links naar rechts: Pierre Knoben, manager Finance en HR; Stephan Hotz, general manager van Pfeiffer in de Benelux; Kaya Busch, mede-eigenaar en mede-CEO van de Busch Group; Peter Spierenburg, manager service. (Foto: Pfeiffer Vacuum+Fab Solutions)

KIEM HighTech in 2025

De subsidieregeling KIEM HighTech komt ook in 2025 beschikbaar. De ervaringen met de regeling in 2024 laten zien dat met de laagdrempelige KIEM HighTech regeling innovatievraagstukken van (technologische) mkb-bedrijven goed kunnen worden opgepakt door onderzoekers van kennisinstellingen.

De regeling KIEM HighTech is een stimulans voor innovatie door samenwerking van onderzoekers, mkb-ondernemingen en andere praktijkpartners. Het gaat om eenjarig verkennend onderzoek door hogescholen, universiteiten of overige kennisinstellingen, in samenwerking met mkb-ondernemingen en andere praktijkpartners. De focus ligt op diverse technologiedomeinen die centraal staan binnen de Topsector High Tech Systemen en Materialen. De subsidie is maximaal € 40.000 per aanvraag voor onderzoekers en de partners in het onderzoek cofinancieren 25% van het subsidiebedrag.

KIEM HighTech is een samenwerking tussen Regieorgaan SIA (onderdeel van NWO) en Holland High Tech (Topsector High Tech Systemen en Materialen). Begin 2025 volgt meer informatie over de regeling op de websites van Regieorgaan SIA en Holland HighTech.

www.regieorgaan-sia.nl/financiering/kiem/kiem-hightech/
www.hollandhightech.nl



Kennisdelen op het gebied van contamination control

Vorige maand organiseerde de VCCN het jaarlijkse Contamination Control Congres. Met gemiddeld een 8,3 aan bezoekerswaardering, een opkomst van 200 vakgenoten, een bedrijvenmarkt met 28 deelnemers en een interessant lezingenprogramma was het een geslaagd event. Er waren drie programmalijnen: Contamination Control, Life Sciences en Fundamentals.

Duurzaamheid is tegenwoordig een zeer belangrijk en actueel aandachtspunt binnen controlled environments, of dit nu een cleanroom of een operatiekamer betreft. Binnen het lezingenprogramma lag de nadruk op energiebesparing (met name door verlaging van de totale luchthoeveelheid), circulariteit en de exploitatie van de cleanroom. Onderzoeken laten zien dat voor verlaging van de luchthoeveelheid, en daarmee energiebesparing, meer kennis over de bronsterkte van contaminatie noodzakelijk is. De beschikbare normen geven al mogelijkheden om daarmee de berekeningen van de toe te passen luchthoeveelheden uit te voeren.

Contaminatiebeheersing in de sector Life Sciences vraagt om een specifieke benadering, mede omdat wet- en regelgeving hier belangrijk is. Er werd kennis gedeeld rond vragen als:

- Hoe ga je om met microbiologische contaminatie?
- Hoe ontwerp en realiseer je een BSL3 laboratorium?
- Hoe kun je data gebruiken in je kwaliteitssysteem?

Monitoring van de real-life contaminatie of depositie is bijvoorbeeld in de farmacie belangrijk. De kennis die hier wordt opgedaan, is ook bruikbaar in vakgebieden zoals de micro- en nanotechnologie.

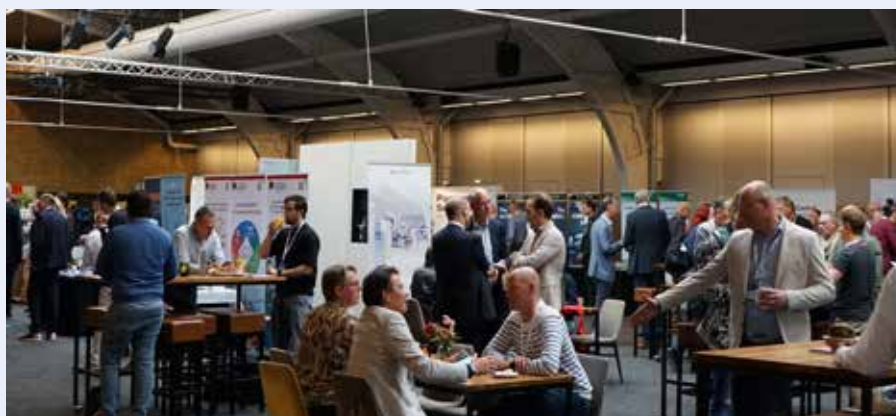
Steeds meer bedrijven krijgen te maken met de eis om schoon te produceren en daarmee de noodzaak een cleanroom te bouwen. Om hen op weg te helpen in de wereld van contamination control en kennis te bieden over het ontwerpen, bouwen en beheren van een cleanroom, was het Fundamentals-programma georganiseerd; het werd druk bezocht. De lezingen gingen over het ontwerpproces, waarbij de nadruk lag op de juiste maatregelen op basis van de te verwachten contaminatie, de toe te passen normen en de validatie van de cleanroom.

In aanvulling op het bestaande cursusprogramma heeft VCCN besloten te starten met een geregistreerde post-hbo opleiding Contamination Control & Cleanliness, zo werd tijdens het congres aangekondigd. De 15-daagse opleiding biedt kennis van contamination control en productreinheid op een integrale wijze aan.

Ook worden de benodigde vaardigheden gepresenteerd voor ontwerpers, bouwers en beheerders van cleanrooms en schone productielijnen. De integraliteit wordt zichtbaar in de kennis van contaminaties, de risico's, de beschikbare maatregelen en het beheer van de schone productie-omgeving. De start van de opleiding staat gepland op 4 maart 2025.

Op de bedrijvenmarkt werd het boek 'Strategieën Contamination Control en Productreinheid' gepresenteerd. Dit werd gedaan door het eerste exemplaar uit te reiken aan auteur Koos Agricola. Het uitgebreide naslagwerk is te bestellen via de website van VCCN en de QR-code.

(Verslag: Jos Bijman, kennismanager VCCN)



De bedrijvenmarkt fungeerde voor, tussen en na de lezingen als een ontmoetingsplek waar laatste innovaties werden getoond.



Stel je voor: Mark Driessen

Hij en zijn broer Coen zijn mede-eigenaren van D&M Vacuümsystemen in Budel, waar hij de functie van sales director vervult. "Ik ben vaak een spin in het web tussen de interne afdelingen voor vacuümtechnische vraagstukken en met de klanten probeer ik vacuümitdagingen te vertalen in echte oplossingen of machines." Mark Driessen stelt zich voor.

"Na een opleiding Fijnmechanische techniek op het MBO ben ik naar Fontys gegaan voor de HBO-opleiding Werktuigbouwkunde/Mechatronica. Daar ben ik afgestudeerd op contaminatie-onderzoek bij FOM Rijnhuizen. Dat ging om (U)HV-sputterdepositie in combinatie met XPS/Auger op EUV-optiek. Ik werkte er met een sample-transfersysteem bij 10^{-10} mbar tussen de sputterdepositie en de verschillende dunnelagen-karakterisatiesystemen."

Vacuümtechniek en klantuitdagingen

"In mijn loopbaan heb ik mij toegelegd op het combineren van vacuümtechniek met de uitdagingen die ik in de praktijk tegenkom. Dit doe ik altijd samen, intern met collega's en extern met klanten. De laatste twintig jaar heb ik met het team een gigantisch mooie ontwikkeling doorgemaakt. Bij D&M Vacuümsystemen bouwen we veel machines voor uiteenlopende applicaties, waardoor we elke dag voor nieuwe uitdagingen staan."

Met de paplepel ingegoten

"Mijn vader Cees heeft D&M Vacuümsystemen opgericht in 1992 als een spin-off van de vacuümafdeling van Philips. Vacuümtechniek is ons dus letterlijk 'met de paplepel ingegoten'. Tijdens mijn studietijd heb ik onder meer in een zomervakantie een LCD-lijn opgebouwd in China. Buiten

schooltijd en in de avonden en weekends was ik als het uitkwam eigenlijk altijd met vacuüm bezig."

De literatuur induiken

"Elke dag heb ik weer met vacuümtechniek te maken. Omdat het een leuk vakgebied is, zie ik het niet altijd als werk. Vaak duik ik 's avonds nog in literatuur over specifieke thema's, omdat ik de interesse heb en wil weten hoe iets werkt of in elkaar steekt."

Van ASML tot Quooker

"Als ik terugkijk op de laatste twintig jaar heb ik veel mogen meemaken. Ik noem de RGA-systemen die we hebben ontwikkeld voor ASML en hun supply chain; daarvan hebben we 300+ stuks in alle vormen en maten, tot 12.000 liter inhoud, over de hele wereld geleverd. Bijzonder was ook het sputterdepositiesysteem voor de tecoaten balloon dog(s) van de bekende kunstenaar Jeff Koons. Verder hebben we inline sputterdepositiesystemen gebouwd voor allerlei applicaties, zoals solar- en displayproductie. Voor Quooker hebben we dan weer een hoogvacuüm-hogetemperatuursysteem ontwikkeld voor de conditionering van hun nieuwste generatie boilers."

Nieuwe ontwikkelingen

"Mooi vind ik ook dat we hebben mogen bijdragen aan nieuwe ontwikkelingen. Een voorbeeld is cryostaatconditionering voor neutrino-onderzoek in het Italiaanse Laboratori Nazionali Gran Sasso. Of kijk naar onze systeemontwikkeling voor het vacuümgieten van de ontsteker van de nieuwste Ariane 6 raket van ESA. Bijzonder is ook het systeem voor energieopslag in een vacuümvliegwieltje. Te veel om allemaal op te noemen. Zeker zo belangrijk als de vacuümtechniek

Agenda

21-22 januari 2025

NWO Physics
Veldhoven

3-6 februari 2025

IUVSTA Workshop
Ultra-clean Vacuum
Delft

11 maart 2025

VCCN Cleanliness Day
Eindhoven

11 april 2025

Fysica 2025
Leiden

15-17 april 2025

IVEC 2025,
26th International Vacuum
Electronics Conference
Rotterdam

17 april 2025

Clean Event 2025
Veldhoven

23 mei 2025

NEVAC-dag
Enschede

8-11 juli 2025

IVNC 2025, 38th International
Vacuum Nanoelectronics
Conference
Reykjavik, IJsland

15-19 september 2025

IVC-23, 23rd International
Vacuum Congress
Sydney, Australië

Links naar event-websites:
Agenda op www.nevac.nl



Mark Driessen bij een klantspecifieke hoogvacuüm-uitstookoven (infrarood) met mogelijkheid voor restgasanalyse.

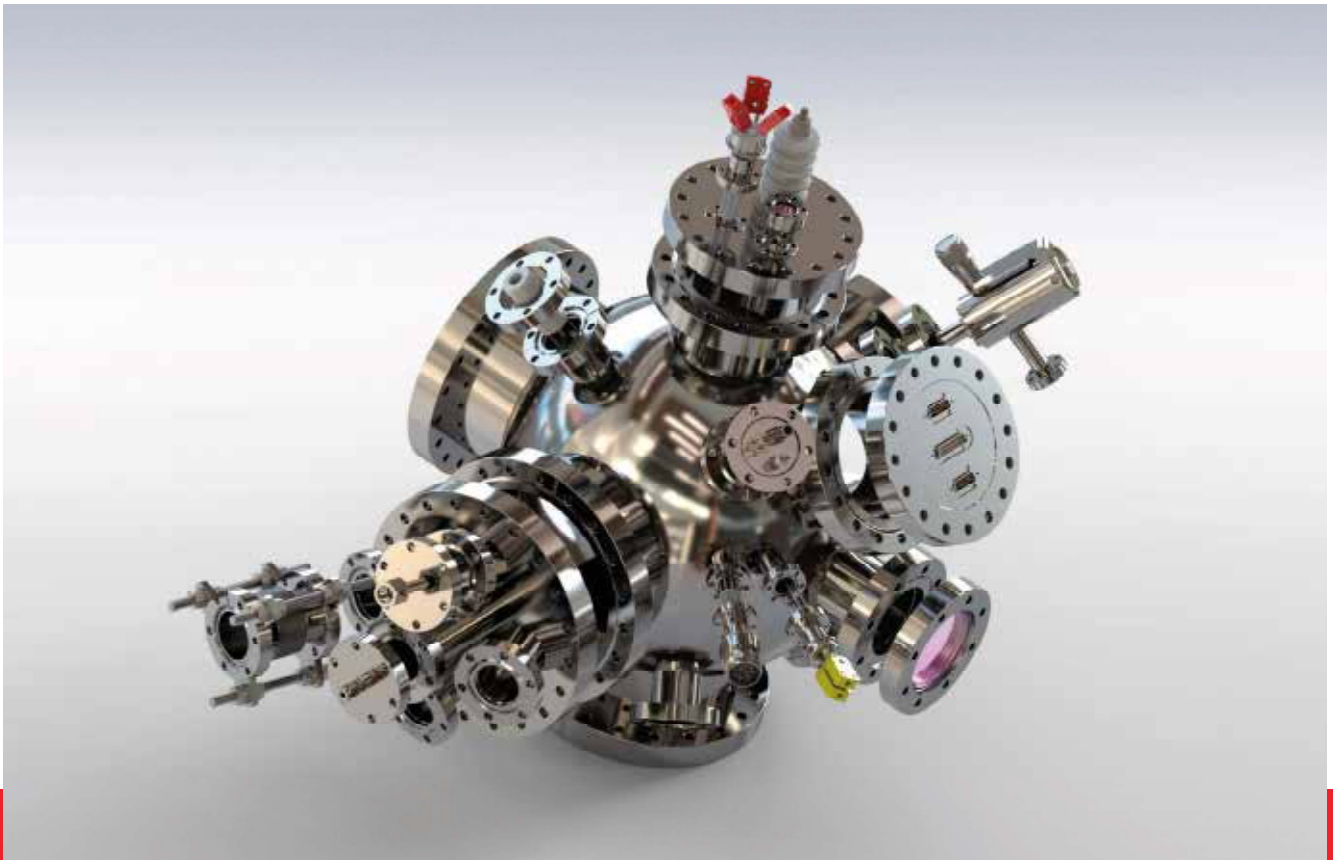
vind ik de vele mensen met wie ik nationaal en internationaal heb samengewerkt en die me inspireerden of uitdaagden in de vacuümtechniek.”

Kennis delen

“Wij zijn lid van de NEVAC omdat het goed is als bedrijfslid om met medespecialisten samen te komen. Zo kunnen we kennis delen en samen kijken wat de nieuwe ontwikkelingen zijn en waar kansen liggen voor de markt.”

Toegepaste vacuümtechniek

“Ik heb nog wel een suggestie voor de NEVAC en dat is om de toegepaste vacuümtechniek meer te laten zien. Dit kan zorgen voor meer samenwerking tussen scholen en bedrijven.”



- Vacuum Components
- Custom Vacuum Chambers
- Custom Manipulators
- Mass Spectrometers and RGAs
- Mass Flow Control
- Plasma Treatment Systems
- PVD/CVD Systems

Specialized in Vacuum and Cryogenic Technology
with more than 50 years of experience