



National
Metrology
Institute

Programma voor de Nationale Meetstandaarden

Publieke verantwoording 2024

Verplichtingsnummer 1300034549

Inhoudsopgave

1	Woord van de directeur	4
2	Inleiding	5
3	Samenvatting per vakgebied.....	6
3.1	Omvang van het programma	6
3.2	Chemie	6
3.3	Massa en gerelateerde grootheden	7
3.4	Thermometrie	7
3.5	Elektriciteit	8
3.6	Tijd en Frequentie	9
3.7	Lengte	10
3.8	Optica	11
3.9	Volumetrie	12
3.10	Ioniserende straling	12
3.11	Data Science en Modelling	13
3.12	Metrologische infrastructuur	14
4	Research	16
4.1	Energie en Klimaat.....	16
4.1.1	Metrologie voor het koolstofvrij maken van het aardgasnetwerk (Decarb).....	16
4.1.2	Opschalen van waterstofproductie (HyScaling)	17
4.1.3	Green Transport Delta – Waterstof (GTD-H)	18
4.1.4	Metrologie voor het achtergrondniveau van CO ₂ in lucht	19
4.1.5	Validatie van biomethaan conformity assessment (BiometCAP)	19
4.1.6	Metrologie voor CCUS (MetCCUS).....	20
4.1.7	Waterstofbemonstering voor zwaar transport (MetHyTrucks).....	21
4.1.8	Waterstof transport, offshore en opslag (HyTROS)	22
4.1.9	Ontwikkeling nieuwe vermogens- en energiemeetsystemen.....	23
4.1.10	Ondersteuning voor een EMN op het gebied van Schone Energie (CleanEnergy).....	25
4.1.11	Metrologie voor DC-netten (DC grids)	26
4.1.12	Metrologie voor digitale instrumenten in onderstations (Digital-IT).....	27
4.1.13	Karakterisatie van middenspanningstransformatoren tot 150 kHz (ADMIT).....	29
4.1.14	Metrologie voor energie-efficiëntie in DC transportsystemen (e-TRENY)	30
4.1.15	Metrologie elektrische laadstations (MET4EVCS)	30
4.1.16	Metrologie voor supercapaciteiten (MetroSuperCap)	32
4.1.17	Betrouwbaarheid van elektrische energie en elektrische energielevering (ENSURE) .	33
4.1.18	Metrologie voor hogedruk-gas- en vloeibare-waterstofflows (MetHyInfra)	33
4.1.19	Metrologie voor waterstof (Met4H2).....	35
4.1.20	Herleidbare metrologie voor waterstof in gasnetwerken (H2FlowTrace).....	36
4.2	Milieu	38

4.2.1	Emissies van gevaarlijke stoffen in binnenlucht (MetrIAQ).....	38
4.2.2	Emissie van ammoniak in de veehouderij (QuantiAGREMI)	39
4.2.3	Meting van atmosferische NO ₂ -concentraties met een hydrogelsensor (GELSONDE) 40	
4.2.4	Metrologie voor groene scheepvaart (MaritimeMET).....	40
4.3	Gezondheid	41
4.3.1	Metrologie voor in de tijd gemoduleerde verlichting (MetTLM).....	41
4.3.2	Metrologie voor draagbare lichtloggers en optische dosimeters (MeLiDos).....	43
4.3.3	Dosimetrie voor Röntgendiagnostiek (TraMeXI)	43
4.4	Geavanceerde elektronica	44
4.4.1	Metrologie voor watersporen in ultrapure gasen (PROMETH2O)	44
4.4.2	HF-metrologie voor toekomstige communicatiebehoeften (FutureCom)	45
4.4.3	HF-metrologie voor supergeleidende quantumcircuits	46
4.4.4	Efficiëntiemetingen aan vermogenselektronica (PowerizeD).....	47
4.4.5	HF-metrologie voor toekomstige on-wafer industriële toepassingen (OnMicro).....	48
4.4.6	HF-metrologie voor 6G ontwikkeling (RF46G)	49
4.4.7	Hybride 4D-fabricagemethode (AMPERE)	50
4.4.8	De grenzen van optische nanometrologie verleggen (POLight)	51
4.4.9	Herleidbaarheid voor optische microscopie (TracOptic)	52
4.4.10	Herleidbare optische constanten en nanolaagjes (ATMOC).....	54
4.4.11	Lenzloze afbeelding van nanostructuren met röntgenstraling (LINX).....	55
4.4.12	Hyperspectrale coherente Fourier scatterometrie en ptychografie (Synoptic Optics) ..	55
4.5	Digitalisatie en Connectiviteit	56
4.5.1	Nauwkeurige positionering door draadloze tijdtransfer (Super-GPS2).....	56
4.5.2	Digitale metrologische tweelingen voor geavanceerde maakindustrie (ADAM)	56
4.5.3	Herleidbare Machine Vision (DI-Vision)	57
4.5.4	Betrouwbare virtuele experimenten en digital twins (ViDiT)	58
4.5.5	Fundamentele eigenschappen van sensor netwerken (FunSNM).....	59
4.5.6	Verbetering van microfluidic sensing m.b.v. kunstmatige intelligentie (MOSAIC).....	60
4.6	Overige projecten	61
4.6.1	Concept voor een echte 8-digit digitizer (True8Digit).....	61
4.6.2	Verplaatsbare optische klokken (TOCK)	61
4.6.3	Fundamentele fysica met koude moleculen (COMOMET)	63
4.6.4	Sensoren voor trillingsisolatie in de Einstein Telescoop (SENVIDET).....	63
4.6.5	Radiometrie en fotometrie na de uitfasering van gloeilampen (NEWSTAND)	64
5	Lijst met afkortingen	65

1 Woord van de directeur

Beste lezer,

Voor u ligt de publieke verantwoording van VSL. VSL is het Nationaal Metrologisch Instituut van Nederland en beheert de nationale fysieke meetstandaarden voor Nederland. Daarnaast ontwikkelen wij nieuwe meetstandaarden.

Meetstandaarden zijn een essentieel onderdeel van de kwaliteitsinfrastructuur zoals wij die in Nederland kennen. De kwaliteitsinfrastructuur is het geheel van bedrijven en organisaties die zich inzetten voor de veiligheid, betrouwbaarheid, kwaliteit en duurzaamheid van producten en diensten in diverse sectoren.

Door een samenhangend systeem van normstelling, toetsing, certificering en toezicht, kunnen organisaties en consumenten vertrouwen op wat ze kopen en gebruiken. Voor veel inwoners van Nederland is dat (gelukkig) een vanzelfsprekendheid. Achter de schermen van deze kwaliteitsinfrastructuur werken duizenden mensen om dit zo te houden. VSL draagt hieraan bij door er voor te zorgen dat meetstandaarden beschikbaar zijn voor Nederland.

In 2024 hebben wij onze plannen voor de komende vier jaar vastgelegd. Naast de onderwerpen als energietransitie, gezondheid en milieu, semicon toepassingen en digitalisering, zien wij ook een rol voor ons en onze meetstandaarden op het gebied van Veiligheid en Weerbaarheid. Door de inzet van onze nauwkeurige en betrouwbare tijdsmeting kunnen kritieke infrastructuren zoals luchtverkeer, spoorwegen, energievoorziening en communicatie door exacte tijdsynchronisatie goed en veilig functioneren. Nauwkeurige tijdstempels zijn essentieel voor het detecteren en analyseren van digitale aanvallen, logboekanalyses en forensisch onderzoek. Veiligheidsdiensten en defensiesystemen gebruiken gesynchroniseerde tijd om operaties en communicatie vlekkeloos en veilig te laten verlopen. Hulpdiensten kunnen met exacte timing alert reageren. Denk aan het synchroniseren van meldkamers, GPS-systemen en alarmeringsnetwerken. Zo dragen wij een klein beetje bij aan een veiligere wereld.

Zonder wetenschappelijke meetstandaarden is innovatie niet mogelijk. In 2024 hebben wij een record aantal nieuwe research projecten “gewonnen”. Wij zijn erg trots op dit mooie resultaat en werken met veel passie om de meetvraagstukken voor de toekomst op te kunnen lossen.

In 2024 hebben de 100 collega's van VSL met veel plezier en enthousiasme uitvoering gegeven aan het onderhoud van de meetstandaarden en zijn er mooie stappen gemaakt in diverse research projecten. Meer detail leest u hierover in deze verantwoording. Jaarlijks spreken wij een werkprogramma af met het Ministerie van Economische Zaken, waarvoor wij een vergoeding ontvangen. Deze publieke verantwoording geeft aan welke inzet wij hebben gedaan om de meetstandaarden te onderhouden en tegen welke vergoeding.

Mocht u, na het lezen van dit verslag, nog vragen hebben, dan kunt u ons bereiken op vs1@vs1.nl.

Hoogachtend,

VSL B.V.

Drs F.J.M. van Booma – de Smit RC

Algemeen Directeur

2 Inleiding

In opdracht van de Nederlandse overheid beheert en ontwikkelt VSL primaire meetstandaarden en primaire referentiematerialen. Deze meetstandaarden zijn de eerste schakel in de betrouwbaarheid van elke meting in onder meer wetenschap, industrie en handel. Daarnaast participeert VSL in onderzoeksprojecten voor het ontwikkelen van nieuwere en betere meetmethoden.

Bij het verhandelen van goederen waarbij wordt afgerekend op basis van hoeveelheid, is het van groot belang dat afnemer en leverancier het eens zijn over de hoeveelheid die geleverd is. Het vaststellen van de hoeveelheid vereist een meting en de betrouwbaarheid van deze meting moet dus voor beide partijen boven twijfel verheven zijn. Metingen waarvan de betrouwbaarheid onafhankelijk kan worden vastgesteld vormen daarmee een belangrijke pijler binnen het economisch verkeer. Ook voor industriële productie en innovatie, wetenschappelijk onderzoek, medische toepassingen en op tal van andere gebieden zijn metingen nodig waarvan de betrouwbaarheid geborgd is.

Het borgen van de betrouwbaarheid van metingen begint met het afspreken van eenduidige eenheden waarin de resultaten van deze metingen worden uitgedrukt. In de moderne wereld wordt hiervoor het stelsel van SI-eenheden gebruikt, dat uitgaat van zeven basiseenheden zoals de meter en de seconde, waaruit afgeleide eenheden kunnen worden gevormd door vermenigvuldigen of delen. Het SI-stelsel heeft in Nederland een wettelijke basis in de Metrologiewet.

De definities van de eenheden worden in de praktijk gebracht in fysieke instrumenten die als meetstandaard dienen. Meetstandaarden van dezelfde grootte kunnen met elkaar worden vergeleken, waarbij het verschil tussen de ene en de andere meetstandaard wordt bepaald. Dat proces heet kalibreren. Aan het begin van de keten staat een bijzonder soort standaard, waarvan de waarde niet is bepaald door vergelijking met een hogere standaard van dezelfde soort, maar door het zo zorgvuldig mogelijk realiseren van de definitie van de eenheid. Een dergelijke standaard heet een primaire standaard. Alle andere standaarden zijn secundaire standaarden, die dan herleidbaar zijn naar de primaire standaard die aan het begin van de keten staat. Uiteindelijk kunnen zo ook de meetinstrumenten worden gekalibreerd waarmee hoeveelheden in het economisch verkeer worden bepaald of processen in de industrie beheerst.

Op basis van de Metrologiewet is VSL door het Ministerie van Economische Zaken aangewezen als Nationaal Metrologie Instituut en belast met het beheer van de primaire standaarden voor Nederland. Voor het beheer van deze nationale standaarden is een overeenkomst afgesloten, met daaraan gekoppeld een subsidie ter financiering. Naast het beheren van de primaire standaarden en een aantal hoogwaardige secundaire standaarden omvat deze overeenkomst ook het vertegenwoordigen van Nederland in de internationale overleggen op het gebied van metrologie, deelname aan ringvergelijkingen en het verder ontwikkelen van de meetstandaarden, inclusief bijbehorende automatisering.

De kwaliteit van het standaardenbeheer wordt gewaarborgd door middel van een ISO 17025 accreditatie van de Raad van Accreditatie en deelname aan internationale ringvergelijkingen (key comparisons). De meetmogelijkheden (zogenaamde Calibration and Measurement Capabilities, CMC's) van VSL worden internationaal geaccepteerd onder de wederzijdse erkenning (Mutual Recognition Arrangement, MRA) van het internationale metrologiecomité CIPM en zijn terug te vinden op <https://www.bipm.org/kcdb>.

Om aan de veranderende behoefte in de maatschappij aan nieuwe of betere standaarden te voldoen, doet VSL ook wetenschappelijk onderzoek op het gebied van de metrologie. Ook daarvoor ontvangt VSL financiering vanuit het Ministerie van EZ. Belangrijke onderzoeksthema's waaraan in 2024 gewerkt werd waren energie en klimaat, milieu, gezondheid, geavanceerde elektronica en digitalisering. Veel van de onderzoeksprojecten wordt uitgevoerd met samenwerkingspartners in nationaal of Europees verband. Binnen Europa zijn er aparte onderzoeksprogramma's op het gebied van metrologie waarin de verschillende nationale metrologie instituten samenwerken: het European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR) en de opvolger daarvan, het European Partnership on Metrology (EPM). De looptijd van projecten binnen deze programma's bedraagt typisch drie jaar.

3 Samenvatting per vakgebied

3.1 Omvang van het programma

De totale omvang van het programma voor de nationale meetstandaarden (EZ verplichtingen nr. 1300034549) bedroeg in 2024 € 12 982 079,58. Dit zijn de totale netto kosten, exclusief de bijdrage vanuit andere nationale en Europese subsidiebronnen.

Dit geld is besteed aan het onderhouden van de meetstandaarden, het deelnemen aan key comparisons, afstemming binnen de (inter)nationale metrologische infrastructuur, onderhoud van het kwaliteitssysteem, project- en programmamanagement, opleiding van technische medewerkers, laboratoriumautomatisering, ontwikkelingsprojecten en wetenschappelijk onderzoek.

Hieronder worden de daarvoor verrichte werkzaamheden per vakgebied nader toegelicht.

3.2 Chemie

Het vakgebied Chemie richt zich op herleidbaarheid voor de samenstelling van gasmengsels. Dit wordt gedaan door:

- Het beheer en het ontwikkelen van primaire analysemethoden en het toepassen hiervan op het toekennen van waarden aan referentiematerialen en transferstandaarden;
- Het beheren en ontwikkelen van Primaire Standaard Mengsels (PSM's) en dynamisch bereide referentiegasmengsels;
- Het verzorgen van herleidbaarheid door het leveren van gasvormige referentiematerialen in de vorm van PRM's (Primary Reference Materials), CRM's (Certified Reference Materials) en CGM's (Calibrated Gas Mixtures, door derden gemaakt en door VSL gemeten).

Belangrijkste toepassingsgebieden zijn op het gebied van industrie, energie en milieu. Chemie volgt nauwlettend de maatschappelijke ontwikkelingen op het gebied van de energietransitie en verscherping van wet- en regelgeving van emissie eisen. Andere gebieden, zoals gezondheidszorg worden bediend daar waar er een behoefte is en dit aansluit op bestaande activiteiten.

Het jaar 2024 is voor de Chemiegroep voorspoedig verlopen. Er is steeds meer aansluiting bij binnenlandse subsidieaanvragen en tenders voor consultancy projecten op het gebied van met name CO₂ en waterstof. Op personeel gebied is het goed om te zien dat de nieuwe medewerkers uit 2022 steeds verder ingewerkt raken, wat de efficiëntie in de uitvoering van zowel mengselbereiding als analyse ten goede komt.

Drie EMPIR-researchprojecten, te weten Decarb, Prometh2O en MetriAQ, zijn in mei succesvol afgerond en nieuwe EPM-projecten op het gebied van ammoniak, waterstof en isotoopmetingen zijn eind van het jaar geselecteerd voor funding. Deze zullen in 2025 van start gaan.

Als resultaat vanuit de diverse researchprojecten zijn het beheer en het dienstenpakket uitgebreid met standaarden voor waterstofchloride, oxy-VOC (o.a. methanol, ethanol en aceton) en de analyse van onzuiverheden in waterstof. Verder zijn activiteiten gaande om dit in 2025 verder uit te breiden met onzuiverheden in CO₂, formaldehyde en lagere fracties NO₂ (2-10 µmol/mol).

Naast het reguliere werk aan gasmengsels in cilinders is er steeds vaker de koppeling met het maken van verdunningen in combinatie met het kalibreren of karakteriseren van meetopstellingen. Deze verschuiving zit zowel in de VSL-bijdrage in de (Europese) subsidieprojecten, als bij klantopdrachten. In 2025 zal hiervoor extra aandacht zijn bij opleidings- en inwerktrajecten van medewerkers op deze onderdelen.

3.3 Massa en gerelateerde grootheden

Het vakgebied Massa en gerelateerde grootheden houdt zich bezig met het beheer en de ontwikkeling van meetstandaarden voor massa, druk, viscositeit en dichtheid. Hiermee wordt herleidbaarheid geleverd aan secundaire laboratoria en de industrie. Voor massa is de farmaceutische industrie een belangrijke afnemer, bij druk is er een toenemende belangstelling voor vacuümkalibraties vanuit de halfgeleiderindustrie.

Naast het leveren van rechtstreekse herleidbaarheid op deze grootheden aan externe afnemers, speelt het vakgebied Massa en gerelateerde grootheden een belangrijke rol in de interne herleidbaarheid van VSL, met name richting de vakgebieden Chemie en Volumetrie.

Een grote uitdaging in 2024 was de aanschaf van een nieuwe 1 mg – 10 g robot in het massalab ter vervanging van een verouderd exemplaar. Deze is inmiddels al geïnstalleerd en in gebruik genomen. De Ptlr53 standaardkilo van Nederland is naar Parijs geweest voor kalibratie bij het BIPM, met een goed resultaat: de waarde is binnen de onzekerheid niet significant verschoven ten opzichte van de kalibratie uit 2003. Hiermee is de stabiliteit en onzekerheid van het massastuk aangetoond en is de nieuwe meetwaarde geaccepteerd.

Het beheer van viscositeit is zodanig uitgevoerd dat er precies genoeg ondersteuning was voor de in 2024 geleverde referentiematerialen. Na 2024 is met akkoord van EZ besloten om deze activiteit binnen VSL niet voort te zetten. De apparatuur en olievoorraad is overgedragen aan het Portugese collega-instituut IPQ, zodat de huidige klanten daar terecht kunnen. De ruimte in personele en laboratoriumcapaciteit worden ingezet voor o.a. vacuüm.

Er zijn grote stappen gemaakt in de revisie en ingebruikname van de nieuwe vacuümpstelling. Hiermee wordt een stap gezet om de ambities te realiseren om in de nabije toekomst diensten met deze faciliteit (onder accreditatie) te kunnen aanbieden. De opstelling is gereviseerd met een nieuwe turbomoleculaire pomp. De lage drukken van 10^{-8} mbar zijn gemakkelijk gehaald na de revisie. De werkinstructie is vormgegeven en wordt parallel aan de validatie van de opstelling verder uitgewerkt tot definitieve vorm.

3.4 Thermometrie

De doelstelling van het vakgebied Thermometrie is om de benodigde herleidbaarheid aan de andere standaarden van VSL te leveren en om de Nederlandse industrie te bedienen met meetfaciliteiten in relevante temperatuur- en luchtvochtigheidsbereiken en bijbehorende meetonzekerheden. Dit is een stabiele markt, die is opgebouwd uit bedrijven, kalibratielaboratoria, universiteiten, onderzoeksinstituten en ziekenhuizen. VSL is daarnaast nog steeds een van de weinige instituten wereldwijd, die de hele breedte van de ITS-90 schaal in het primaire bereik van -189 °C tot 1085 °C herleidbaar kan meten door het maken van vaste punten. Daarnaast wordt er met behulp van de primaire luchtvochtigheidsstandaard ook de combinatie van temperatuur en luchtvochtigheid herleidbaarheid aangeboden.

Het standaard beheer van Thermometrie is volgens plan verlopen. Er is een leverancier gevonden voor het leveren van kwartscellen voor de productie van watertripelpuntcellen. De cellen worden in 2025 gemaakt en gevalideerd. Tevens zijn er twee nieuwe kopercellen beschikbaar om te valideren. De ene is door de leverancier beschikbaar gesteld ter vervanging van een gebroken cel en de tweede is door VSL zelf geproduceerd. De klimaatkast voor de weerstanden van het afgeleid lab is aangeschaft en geleverd. Deze zal in 2025 worden gevalideerd en in gebruik genomen worden. De lage-temperatuurcryostaat is volledig gereviseerd, gevalideerd en weer operationeel. De externe audit van de RvA heeft eind mei 2024 plaatsgevonden. De nieuwe meetbrug (Guideline 6640T) is softwarematig geïmplementeerd. Aan de hand van testen is geconstateerd (mede door de leverancier en producent) dat de firmware geüpdatet moet worden. Het apparaat wordt begin 2025 naar de leverancier opgestuurd. Een back-up ijsmachine is besteld, ontvangen, en in bedrijf genomen.

Het standaard beheer van Luchtvochtigheid is volgens plan verlopen. Er zijn significante stappen gezet om de efficiëntie, overzichtelijkheid, en de algemene uitstraling van het vochtlaboratorium te verbeteren. Onder dit initiatief zijn de primaire opstellingen in gesloten kasten met afzuiging geplaatst. Dit verbetert zowel de organisatie van de opstelling als de veiligheid daarvan. De koppelingen en kleppen van de hogedruk dauwpunt generator zijn vervangen door hun VCR (Vacuum Coupling Radiation) varianten of “assembly-by-torque” (AbT) fittings. De verbeterde opstelling is voor de huidige scope gevalideerd en wordt in de context van het Met4H2 researchproject voor drukken tot 60 bar met waterstof als draaggas gevalideerd in 2025. Vanwege een grote vraag vanuit gebruikers is de Heraeus klimaatkast weer operationeel gemaakt en gevalideerd voor luchttemperatuurkalibraties van -30 °C t/m +25 °C.

Het werk aan de TDLAS-transferstandaard verloopt volgens plan. Twee stagiairs, één van de Hoge School van Amsterdam (Technische Natuurkunde), en een tweede van de Haagse Hoge School, hebben aan het project gewerkt. Er moet nog een initieel vergelijk tussen de primaire vochtstandaarden worden uitgevoerd. Hiervoor is een opstelling gebouwd met een Herriott cel, een laser en een lock-in amplifier. Het project zal een gevalideerde transferstandaard opleveren die naast het vergelijk tussen de vochtstandaarden ook voor klantkalibraties gebruikt kan worden. Een vervanging voor de huidige, zeer verouderde twee-druk generator is gevonden; de aanschaf wordt begin 2025 gedaan.

3.5 Elektriciteit

Het vakgebied Elektriciteit omvat elektrische standaarden voor gelijkspanning en gelijkstroom (DC), laagfrequente (LF) wisselspanning en wisselstroom en hoogfrequente (HF) signalen.

VSL beschikt over primaire standaarden voor gelijkspanning door middel van het Josephson effect en voor weerstand door middel van het quantum Hall effect. De andere grootheden in het deelgebied DC worden hiervan afgeleid.

Bij het deelgebied LF gaat het om signalen die oscilleren met de netfrequentie van 50 Hz en daarop voorkomende stoorsignalen met frequenties tot een paar honderd kHz. Het spanningsbereik varieert daarbij van laagspanning tot circa 100 kV. De focus van de activiteiten op het gebied van LF ligt op het nauwkeurig meten van elektrisch vermogen en elektrische energie. Toepassingsgebieden zijn:

- Metering: energiemeting ten behoeve van financiële afrekening;
- Power quality: meting van de kwaliteit van netspanning, stromen, netimpedanties, sommatie, propagatie en diverse andere aspecten met betrekking tot netvervuiling;
- Efficiëntie: bepaling van energieverliezen in componenten en systemen;
- Grid monitoring: het verzamelen van meetdata in het net voor de bewaking en regeling van de netstabiliteit.

Het deelgebied HF verzorgt de herleidbaarheid op het gebied van elektrische metingen van 9 kHz tot circa 50 GHz. Dit omvat de grootheden HF power en S-parameters (impedantie en verzwakking). Naast kalibraties voor secundaire laboratoria richt HF zich in toenemende mate op het meten van planaire componenten voor de halfgeleiderindustrie.

2024 is een productief en druk jaar geweest. Na een geslaagde EPM-uitslag in 2023 zijn er 5 nieuwe onderzoeksprojecten die van start gaan: Met4EVCS, ENSURE, OnMicro, RF 4 6G en MetroSuperCap. Naast de nieuw gestarte projecten zijn er ook enkele projecten succesvol afgerond. Zoals het door VSL gecoördineerde DC Grids waarin er is gewerkt aan opstellingen en methodes voor DC-netten en een kalibratieservice voor DC-vermogensmeters. Het Clean Energy project is afgesloten met de lancering van het nieuwe EMN Clean Energy in een afsluitende meeting bij VSL. Bij HF is het FutureCom project afgerond waarin VSL een referentiewafer voor on-wafer metingen heeft ontwikkeld en eerste metingen met het nieuwe generatie probe-station heeft uitgevoerd tot 50 GHz.

Voor verschillende (primaire) opstellingen in de herleidbaarheidsketen is er een begin gemaakt met het opstellen voor plannen ter verbetering of vervanging van deze veelal wat oudere opstellingen. Afhankelijk van de investeringsruimte zal worden gepoogd deze de komende jaren op te nemen in het activiteitenplan. Ook bij primair vermogen is begonnen met de aanschaf van vervangende apparatuur.

Ook is de Loadloss opstelling verder verbeterd zodat on-site opdrachten met minder risico voor de opstelling kunnen plaatsvinden. Een nieuwe methode om stroomtransformatoren (CT's) te kalibreren is ontwikkeld. Na een eerste test is gebleken dat de ingangen van deze meter een te grote belasting voor de CT's vormen. Hierdoor kunnen de CT's maar met een beperkte set burdens gemeten worden. Een prototype buffer die is ontwikkeld en getest verlaagt de ingangsbelasting waardoor we de complete range van belastingen kunnen aanbieden; dit werk wordt in 2025 afgerond.

Voor Lightning Impulse (LI) is de accreditatie van VSL in de BIPM KCDB opgenomen en de audit voor de RvA-accreditatie is uitgevoerd. Voor AC hoogspanning zijn de entries voor de BIPM KCDB en K999 uitgebreid om 16,7 Hz tot 300 Hz beter op elkaar te hebben afgestemd.

Bij zowel Multifunctie, Weerstand en Impedantie is er geïnvesteerd in automatisering zodat werkzaamheden efficiënter kunnen worden uitgevoerd. Dit proces zal voornamelijk bij Weerstand en Impedantie verder in 2025 worden opgepakt.

In het HF lab is er gewerkt aan een volledig autonoom probe-station voor on-wafer metingen van componenten. Volledig autonoom metingen uit kunnen voeren biedt naast efficiëntiewinst ook de mogelijkheid voor het behalen van de laagste onzekerheden, omdat van de gebruiker afhankelijke factoren dominant zijn. Ter voorbereiding op een scope-uitbreiding tot 110 GHz is er een nieuwe Vector Network Analyser (VNA) gekocht die in 2025 in gebruik zal worden genomen. Daarnaast is er bij HF een nieuwe opstelling ontwikkeld voor het uitvoeren van S-parametermetingen bij cryogene (tot 4 K) temperaturen met als voornaamste applicatiegebied de quantumindustrie.

3.6 Tijd en Frequentie

Het vakgebied Tijd en Frequentie is verantwoordelijk voor het realiseren van de officiële Nederlandse tijd. De herleidbaarheid van de VSL-tijd UTC(VSL) naar Universal Time Coordinated (UTC), zoals die door BIPM wordt berekend, wordt gerealiseerd door 12 keer per dag, d.m.v. Twee-Weg Satelliet Tijd en Frequentie Transfer (TWSTFT), een vergelijking te doen met andere NMI's en door continu metingen te verrichten aan tijdsignalen van navigatiesatellieten (GPS en Galileo).

De Nederlandse markt voor herleidbare tijd- en frequentiemetingen kent een zeer efficiënte disseminatie, waardoor routinematige kalibraties veelal bij geaccrediteerde laboratoria plaatsvinden en meer speciale kalibraties bij VSL worden aangeboden. Herleidbaarheid vindt meestal plaats door gemeenschappelijk te meten aan eenzelfde fenomeen, zoals lange-golf-zenders of GNSS-signalen. De meetresultaten van VSL worden door een abonnement op het Time Service Bulletin (TSB) ter beschikking gesteld.

Daarnaast wordt 24 uur per dag automatisch tijdinformatie via een Network Time Protocol (NTP) server ter beschikking gesteld voor een brede groep gebruikers. Hiermee kunnen computers via een internetverbinding worden gesynchroniseerd met de VSL tijdstandaard.

In de afgelopen jaren is een faciliteit ontwikkeld voor tijdsynchronisatie via glasvezelnetwerken met behulp van het Precision Time Protocol (PTP) en/of het nog nauwkeurigere White Rabbit (WR) protocol. Met deze faciliteit richt VSL zich o.a. op financiële instellingen, beheerders van elektriciteitsnetwerken en kennisinstellingen en universiteiten. Dit wordt in sterke mate gemotiveerd door de noodzaak om onafhankelijk te zijn van satelliet gebaseerde tijdsynchronisatie via GPS of Galileo. Via een intern WR-netwerk levert Tijd en Frequentie herleidbaarheid naar de seconde aan andere vakgebieden.

Mede door de oorlog tussen Rusland en Oekraïne ontstaat een groeiend besef van de kwetsbaarheid als gevolg van afhankelijkheid van satellietnavigatiesystemen voor tijd en navigatie. Dit besef zorgt zowel nationaal als internationaal voor vragen naar tijd- en navigatieoplossingen die onafhankelijk zijn van de Global Navigation Satellite Systems (GNSS) zoals GPS en Galileo. VSL is daarom in 2024 actief betrokken geweest in nationale en internationale overleggen om bij te dragen aan een betrouwbare tijdinfrastructuur die bestaat uit meerdere atoomklokken die met elkaar gesynchroniseerd zijn via netwerkprotocollen zoals NTP, PTP of WR, en die onafhankelijk is van GNSS.

Ook is er een vergelijk afgerond in samenwerking met TimeTech waarvoor VSL de rapportages heeft opgesteld. Het vergelijk ging over twee-weg metingen en de resultaten zijn inmiddels door het BIPM geaccepteerd.

Medio 2024 is de voedingsunit van de waterstofmaser die als hoofdklok dient defect geraakt om onbekende reden waarna er terug is gevallen op een Cs-klok als primaire klok. Samen met de leverancier is de voedingsunit vervangen en is de maser in november weer ingezet als hoofdklok voor de realisatie van UTC (VSL). Binnen de kaders van het TOCK-project en het COMOMET-project wordt in samenwerking met de Universiteit van Amsterdam (UvA) en de Vrije Universiteit (VU) in Amsterdam gewerkt aan een strategie waarbij bij de nauwkeurige tijd en frequentie van VSL direct kan bijdragen aan wetenschappelijk onderzoek op het gebied van quantumtechnologie en fundamentele constanten. De strategie voorziet in de realisatie van een optische klok bij de UvA en een glasvezelnetwerk om dit kloksignaal naar Delft en naar diverse toepassingen te brengen. De nieuwe optische frequentiekam die door de faciliteiten Optica, Lengte en TF is aangeschaft dit jaar, krijgt een sleutelrol in de koppeling tussen de huidige klokken in Delft en de nieuwe optische klok in Amsterdam. De WR verbinding zelf is al succesvol gerealiseerd tussen de UvA en VU.

3.7 Lengte

Het vakgebied Lengte bestaat uit de volgende onderdelen:

- Optische frequentiestandaarden;
- Eindmaten;
- Geometrie;
- Nanometrologie.

Het onderdeel geometrie omvat een grote verscheidenheid aan lengtemetingen. Behalve eendimensionale kalibraties, zoals afstand en diameter, omvat dit deelgebied ook meerdimensionale metingen en vormmeting.

Traditioneel speelt het vakgebied Lengte een belangrijke rol in het leveren van herleidbaarheid voor de hoogwaardige maakindustrie in Nederland. De afgelopen jaren is geïnvesteerd in onderzoek om ook herleidbaarheid te kunnen bieden op nanometerschaal. Dit is de focus van het onderdeel nanometrologie. Hierbij worden voornamelijk geavanceerde optische technieken gebruikt, zoals scatterometrie, ptychografie en flowcytometrie. De toepassingen liggen op het gebied van de halfgeleiderindustrie, maar ook in metingen van nanodeeltjes in het kader van milieu en gezondheid.

Over het algemeen is het beheer van Lengte volgens plan verlopen. In de eerste periode van 2024 is het voorstel tot reductie van de scope geaccepteerd en doorgevoerd wat weer meer ruimte geeft om het beheer goed uit te voeren.

Er zijn enkele kleine tegenvallers met bijvoorbeeld het uitvallen van de AFM, de rondheidsmachine voor de laagste onzekerheid en waterbadkoelers, maar hier zijn mitigatieplannen voor gemaakt. De sensor van de rondheidsmachine bleek de oorzaak te zijn en is vervangen. Op basis van gesprekken met en bezoek bij twee verschillende leveranciers van AFM-systemen is er een keuze gemaakt en is eind 2024 de order geplaatst. Installatie en validatie zal in de loop van 2025 plaatsvinden.

Ook is er een hoogtepunt in de aanschaf van de frequentiekam. Na een intensief traject samen met meerdere leveranciers is er uiteindelijk gekozen voor een systeem van Menlo. De installatie is gerealiseerd in november en de validatie van de kalibratie van laserfrequentie is gestart en zal medio 2025 worden afgerond.

Alle laserinterferometers (vijf stuks) zijn op lengte gekalibreerd. Op basis van de extra verificatie en kalibratie is vastgesteld dat alle laserinterferometers onderling niet significant verschillen wat betreft nauwkeurigheid van het telsysteem en drift gedurende de 16 uur. Daarmee is aangetoond dat alle systemen voldoen aan de eisen voor onze kalibratieopstellingen waar ze worden toegepast. Eind 2024 is een nieuwe laserinterferometer aangeschaft met 3 bundels, die naast de verplaatsing ook de pitch

en yaw meet voor nauwkeurige Abbe correcties. Deze laserinterferometer zal begin 2025 in gebruik worden genomen.

Afgelopen periode is er ook druk gewerkt aan de afsluitende rapportages van de aflopende research-projecten POLight, ATMOC, AMPERE en TracOptic. Er zijn nieuwe researchprojecten gestart in september, namelijk ADAM en DI-VISION. Beide projecten hebben betrekking op ontwikkeling van nieuwe kalibratiemethodes met behulp van de 3D-CMM. Ook is er gewerkt, samen met een stagiair aan het verbeteren van de picometerdriftopstelling. Tot slot is er in juni een nieuw project gestart, SENVIDET, in het kader van technologie ontwikkeling voor de Einstein Telescope in samenwerking met enkele MKB-bedrijven die nauwkeurige verplaatsingssensoren ontwikkelen.

3.8 Optica

Het vakgebied Optica omvat de deelgebieden Fotometrie en Radiometrie. Bij Fotometrie gaat het om lichtmetingen die gewogen zijn met de respons van het menselijk oog. Bij Radiometrie wordt gekeken naar de energie-inhoud van het licht. Daarbij wordt een golflengtegebied afgedekt van circa 250 tot 2000 nm.

Voor Fotometrie richt de dienstverlening zich vooral op de verlichtingsmarkt met kalibratie van lichtbronnen en -sensoren. Voor Radiometrie is de markt diverser en worden kalibraties van lichtbronnen en detectoren uitgevoerd en advies geleverd voor verschillende industrietakken, waaronder de ruimtevaartindustrie. Op het grensgebied van Fotometrie en Radiometrie richt Optica zich op het leveren van metrologie voor het kwantificeren van gezondheids- en veiligheidsaspecten van verlichting en lichtbronnen.

Het beheer voor fotometrische kalibraties van luminantie- en illuminantiemeters is volgens planning uitgevoerd. Voor Radiometrie zijn de kritieke kalibraties en kwaliteitsonderdelen volgens plan uitgevoerd. Ook is er een inventarisatie gemaakt van alle kritieke onderdelen die op (korte) termijn moeten worden vervangen bij voornamelijk de ACR- en SIRC-opstellingen.

Voor het ontwikkelingsproject “LED-gebaseerde schaalrealisatie” is de verdere uitwerking van de kwaliteit van de schaalrealisatiemetingen die vorig jaar zijn uitgevoerd onderhanden. De onzekerheidsanalyse en kwaliteitsdocumenten voor de primaire schaalrealisatie van illuminantiemeters tegen een LED-bron kunnen worden afgerond, maar het project loopt wat achter op schema door prioriteiten elders. Dit zal in 2025 worden afgerond.

Voor het project “metrologie voor in de tijd gemoduleerde verlichting” (MetTLM) zijn de resultaten van een ringvergelijking geanalyseerd. Tevens is er een raamwerk ontwikkeld voor berekening van onzekerheden in metingen aan tijd gemoduleerde verlichting. De resultaten van het onderzoek zijn gepresenteerd in een gezamenlijke webinar met LightingEurope en een afsluitende workshop. VSL heeft de slotbijeenkomst van het MetTLM project inhoudelijk voorbereid en geleid. Het project is nu volledig afgerond en de ontwikkelde opstellingen worden ingezet voor dienstverlening aan klanten.

Voor het project “metrologie voor draagbare lichtloggers en optische dosimeters” (MeLiDos) is op basis van selectiecriteria een keuze gemaakt voor lichtloggers die binnen het project gemeten zullen worden. Scripts zijn ontwikkeld voor het meten en analyseren van de relatieve spectrale response van de geselecteerde lichtloggers. Hiermee zijn de loggers inmiddels gemeten. Tevens is een spectraal verstelbare bron in gebruik genomen waarmee verder onderzoek is gedaan naar de spectrale responsiviteit van de lichtloggers.

Binnen het project “radiometrie en fotometrie na de uitfasering van gloeilampen” (NEWSTAND) is er voor WP1 samen met PTB gekeken naar lens-gebaseerde collimerende optiek voor de ontwikkeling van de Laser Driven Light Source (LDLS) als spectraal breedbandige bron. Het ontwerp is gemaakt en opgebouwd bij VSL, maar de stabiliteit en uniformiteit is niet voldoende en zal deels worden gecorrigeerd met een monitordetector van een andere projectpartner.

3.9 Volumetrie

Binnen het vakgebied Volumetrie zijn metingen ondergebracht van volume- en debietmetingen van vloeistoffen en gassen onder verschillende drukken. De focus ligt daarbij sterk op de energiesector met lage- en hogedruk aardgas, Liquefied Natural Gas (LNG) en waterstof. Nederland speelt een belangrijke rol in afstemming van de primaire realisaties van de kubieke meter hogedruk aardgas in Europa via het samenwerkingsverband EuReGa¹.

De activiteiten op het gebied van waterflow en LNG zijn ondergebracht in het European Center for Flow Measurement (ECFM) op de Maasvlakte in Rotterdam. Daar bevinden zich twee faciliteiten voor waterstroming, voor een debiet tot 650 m³/h en 2500 m³/h respectievelijk. De faciliteiten voor LNG bestaan uit de primaire standaard, waarvoor het beheer betaald wordt vanuit het programma, en de mid-scale faciliteit die niet publiek gefinancierd wordt.

Bij de waterflow op de Maasvlakte zijn de werkzaamheden voortvarend verlopen. De collega's raken steeds beter ingewerkt en meer vertrouwd met de nieuwe faciliteiten. Daarnaast zijn voor de WF650/2500 installaties en volumekalibraties automatiseringen qua dataverwerking doorgevoerd.

Daarnaast is ook op de Maasvlakte dit jaar weer LNG gaan stromen. Ook hier zijn kalibraties voor gebruikers uitgevoerd en zijn er veel testen en metingen uitgevoerd om het systeem te valideren. Na bijna twee jaar niet operationeel geweest te zijn was er het nodige onderhoud nodig, maar de faciliteiten zijn weer volledig operationeel.

Bij hoge druk gas hebben grote meetcampagnes voor diverse (onderzoeks)projecten plaatsgevonden. Zo is er voor MetCCUS met aardgas en CO₂ gemeten, voor Met4H2 met waterstof verrijkt aardgas en er zijn metingen uitgevoerd voor een primair vergelijk voor de hoge druk harmonisatie CCM-FF-K5C. Deze meetcampagne gaf ook input voor de vervanging van de rotormeters die gepland staat.

Bij gas lage druk lag de focus op de voorbereiding van de opwerking van de Grote Installatie (GI). De automatisering van de GI is bijna af en is reeds gebruikt voor een deel van de metingen bij de GI opwerking.

3.10 Ioniserende straling

Het vakgebied Ioniserende Straling (IO) ontwikkelt, beheert en levert herleidbaarheid naar primaire dosimetriestandaarden. Ioniserende Straling levert dosimetrische kalibraties, in haar eigen faciliteiten, en, in toenemende mate, bij ziekenhuizen, bedrijven en instellingen op locatie.

Schade aan menselijk weefsel door blootstelling aan ioniserende straling is sterk gecorreleerd met de geabsorbeerde dosis ioniserende straling. Het absoluut en herleidbaar meten van dosis (dosimetrie) is dan ook belangrijk bij toepassingen van apparatuur die ioniserende straling uitzendt en radioactieve bronnen.

De grootste bijdrage aan de totale stralingsblootstelling van de Nederlandse bevolking komt van medische toepassingen. Het gaat hierbij voornamelijk om toepassingen voor radiodiagnostiek en radiotherapie. Bij diagnostiek wordt de dosis aan de patiënt zo laag mogelijk gehouden om een medische vraagstelling te beantwoorden. Bij radiotherapie wordt juist doelgericht een hoge dosis aan een tumor gegeven, waarbij gezond weefsel zo veel mogelijk wordt gespaard. De vereiste nauwkeurigheid voor afgegeven dosis en dosimetrie is bij radiotherapie dan ook veel hoger.

Ook buiten de gezondheidszorg zijn er diverse bronnen van ioniserende straling waar werknemers, bevolking en milieu aan worden blootgesteld. Hier geldt het basisprincipe van de stralingsveiligheid, dat blootstelling zo laag als redelijkerwijs mogelijk is moet blijven. Daarom is met name controle van de dosis waaraan personen worden blootgesteld belangrijk.

¹ Zie <https://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/project/eurega-1>.

Voor radiotherapie is een apart programma, gefinancierd vanuit de instituten waar radiotherapie plaatsvindt. Vanuit de EZ-subsidie wordt het beheer en de ontwikkeling van de standaarden voor van de Röntgenstraling betaald. Dit is in 2024 succesvol uitgevoerd.

In het EPM-programma neemt IO deel aan het TraMeXI project wat als doel heeft de ontwikkeling van nieuwe referentie kwaliteiten voor radiodiagnostische toepassingen.

3.11 Data Science en Modelling

In het vakgebied Data Science en Modelling (DSM) zijn de activiteiten ondergebracht die gericht zijn op dataverwerking en modelvorming in de metrologie. Dit betreft o.a. kennis en methoden gericht op onzekerheidsberekening, geavanceerde modellering door middel van digitale tweelingen, toepassing van kunstmatige intelligentie en beeldverwerking.

De Data Science en Modelling groep heeft in 2024 zowel aan eigen onderzoeksprojecten gewerkt als ondersteunend aan projecten geleid door andere technologieën. In het kader van infrastructuur is er deelgenomen en input geleverd aan JCGM WG1 m.b.t. de Guide to the expression of Uncertainty in Measurement (GUM), de werkgroep digitalisatie van TC-IM (Interdisciplinary Metrology) en EMN Mathmet. Ook is een bijeenkomst van het BIPM Forum for Digitalization in Metrology bezocht. Met betrekking tot kwaliteit worden in het team met enige regelmaat de DSM Good Practices besproken en vastgelegd, o.a. m.b.t. softwarevalidatie en het gebruik van Git voor software versiebeheer, in samenspraak met het Application Services (AS) team. Ook is er eind 2024 in samenwerking met het AS team een nieuwe server voor high-performance computing in gebruik genomen. Deze machine zal worden ingezet voor nieuwe projecten op het gebied van Machine Learning (ML) en rekenintensieve simulatiemodellen.

In het project met betrekking tot 'Kennisopbouw op het gebied van beeldverwerking' is er voor gekozen een VSL-casus met betrekking tot digit recognition nader te bestuderen. Hierbij wordt transfer learning toegepast op een open-source implementatie van het Mask-RCNN neurale netwerk.

In het ViDiT-project zijn verschillende manieren om onzekerheden te berekenen met behulp van Virtuele Experimenten geïmplementeerd en vergeleken voor een vereenvoudigde virtuele CMM. In samenwerking met PTB is er gewerkt aan verschillende presentaties en publicaties omtrent dit werk.

In het FunSNM project is er gewerkt aan het modelleren van verschillende soorten van correlaties in sensornetwerken door middel van Gaussische processen. De resultaten hiervan toegepast op een netwerk van NO₂-sensoren en zijn op de IMEKO 2024 conferentie in Hamburg gepresenteerd. Tevens is er in samenwerking met twee andere Europese onderzoeksprojecten een webinar georganiseerd met als titel "Enhancing Air Quality Sensor Networks for citizen science. Clustering approaches by COMPAIR, FunSNM and SOCIO-BEE".

Voor het project 'Verbetering van microfluidic sensing m.b.v. kunstmatige intelligentie (MOSAIC)' is de kick-off bijeenkomst van de gebruikerscommissie bijgewoond en is er kennisgenomen van literatuur op dit gebied.

Naast deze projecten heeft de DSM bijgedragen aan de projecten QuantiAGREMI, ATMOC, Met4H2, MetHyInfra, ADAM, DI-Vision, NEWSTAND, MetSuperCap en 'Metrologie voor het achtergrondniveau van CO₂ in lucht'.

In Met4H2 heeft DSM bijgedragen aan de modellering van de instrumentele onzekerheid van metingen in gasnetwerken. Daarnaast is gewerkt aan de tijdreeksanalyse. Op dit moment worden deze activiteiten geïntegreerd en aan de software binnen het project toegevoegd. Vanuit JCGM WG1 (GUM) is er veel belangstelling voor vooral deze integratie die mogelijk aanleiding geeft om diverse delen van de GUM aan te vullen. Dit thema wordt nu niet geadresseerd in de GUM.

Binnen de EPM Call 2024 was DSM verantwoordelijk vanuit VSL voor de gehonoreerde JRP voorstellen die gaan over de betrouwbaarheid van tools om data uit het elektriciteitsnetwerk te analyseren ("Metrology for Reliable Power Grid Data Analytics"), het toepassen van beeldherkenning op MRI

plaatjes ("Trustworthy and quality-assured quantitative magnetic resonance imaging"), en het ontwikkelen van tools voor data in gasnetwerken ("Metrology for smart metering in gas networks"). Daarnaast heeft DSM een ondersteunende rol in de volgende succesvolle voorstellen: "Hybrid metrology for sustainable and low-carbon footprint battery materials", "Establishing traceable concentration measurements of particles for a more sustainable industry" en "Metrology for reliable liquefied energy gases measurement".

3.12 Metrologische infrastructuur

Onder de noemer "metrologische infrastructuur" zijn de activiteiten ondergebracht met een technologie-overschrijdend karakter die nodig zijn voor het beheer, de afstemming en de verdere ontwikkeling van de nationale meetstandaarden. Dit betreft het algemene deel van de nationale en internationale infrastructuur, het algemene deel van het kwaliteitssysteem, het management van het gehele programma en de algemene technische automatiseringsinfrastructuur. Ook zijn hier centraal de uren voor technische opleiding van medewerkers ondergebracht, aangezien niet op voorhand te voorspellen is op welk vakgebied nieuwe medewerkers moeten worden ingewerkt.

Het jaar 2024 kende een zeer gering personeelsverloop, waardoor het opleidingsbudget kon worden ingezet voor het inwerken van collega's als back-up bij diverse onderdelen. Tevens is een VSL-brede training gegeven aan een groep nieuwe interne auditoren en een verdiepende training voor bestaande interne auditoren om het kwaliteitsbewustzijn dieper in de organisatie te krijgen. In het kader van het lopende ISO 27001 en BIO 2.0 certificeringstraject is VSL-brede training informatiebeveiliging gegeven.

De vertegenwoordigingen in het kader van de internationale infrastructuur zijn volgens plan verlopen. In de eerste week van juni heeft bij NPL in Teddington de EURAMET General Assembly plaatsgevonden, waarbij VSL vertegenwoordigd was met de TC-voorzitters van Ioniserende Straling en Flow, de EMN-voorzitster van Energy Gasses en de VSL-delegate. De TC-voorzitter van Ioniserende Straling, Jacco de Pooter, droeg de voorzittershamer over aan zijn opvolger en werd door EURAMET bedankt voor de bewezen diensten. De deelname aan de EPM calls in 2024 was zeer succesvol. VSL heeft 13 van de 17 ingediende voorstellen toegekend gekregen, overeenkomend met 75% van het ingediende budget. Vier van de vijf door VSL-ers verdedigde voorstellen zijn toegekend, waaronder één met de maximaal haalbare score.

In mei heeft de RvA-audit plaatsgevonden. Door de auditors is duidelijk het vertrouwen uitgesproken in de organisatie, de faciliteiten en de competenties van het personeel. De nieuwe VSL kwaliteitsmanager heeft de beantwoording van de geconstateerde afwijkingen voortvarend opgepakt.

Op het gebied van programmamanagement is dit jaar extra aandacht besteed aan de langetermijn, met de afstemming van een nieuw meerjarig subsidiekader en het opstellen van het meerjarenplan voor de periode 2025-2028. Ook is een langetermijn investeringsplan ingediend om de achterstand in vervanging van verouderde apparatuur in te lopen zodra extra middelen hiervoor beschikbaar komen vanuit EZ. Een eerste start is reeds gemaakt door de inzet van de 'BTW-reserve' ontstaan uit teruggave van de BTW over het SBO-contract. Dat heeft o.a. geresulteerd in de aanschaf van de nieuwe frequentiekam bij Lengte en een weegrobot bij Massa en gerelateerde grootheden. Andere investeringen vanuit dit geld zijn voorbereid en zullen begin 2025 worden ingezet.

De algemene automatiseringsprojecten hebben in de 2024 goede voortgang geboekt. Alle VSL-brede automatiseringsprojecten die in het werkplan staan zijn afgerond, waarmee een goede stap is gezet in het realiseren van een effectieve en uniforme automatiseringsinfrastructuur. Verder is het eerste deel van de labcomputers zijn gemigreerd naar Windows 11 en zijn oude computers vervangen. Er is een nieuw rekencluster aangeschaft en in gebruik genomen. De installatie is volgens plan gegaan en het nieuwe cluster is direct in gebruik genomen door de desbetreffende technologieën.

Wegens de internationale digitalisering en de toename in cyber security dreigingen is VSL in 2023 een traject gestart om een certificering conform ISO 27001 en BIO2 te behalen. In december 2024 heeft de ISO 27001 beoordeling met goed resultaat plaatsgevonden. VSL verwacht in het eerste kwartaal van

2025 het certificaat te ontvangen. De certificering van de BIO2 zal worden afgerond zodra de BIO2 definitief is gepubliceerd.

4 Research

4.1 Energie en Klimaat

4.1.1 Metrologie voor het koolstofvrij maken van het aardgasnetwerk (Decarb)

Projectdoel: Het ontwikkelen van oplossingen voor de belangrijkste vier meetuitdagingen (debietmeting, samenstelling, fysische eigenschappen en lekdetectie), die de industrie ervaart om het aardgasnet koolstofvrij te maken door introductie van biomethaan, met waterstof verrijkt aardgas, puur waterstof en CO₂-afvang en opslag.

Looptijd: Juni 2021 – mei 2024

De Europese aardgasmarkt levert momenteel 24% van de totale energie benodigd voor alle huishoudens. Volgens de European Environment Agency (EEA) is de energiesector verantwoordelijk voor het grootste aandeel van koolstofdioxide-emissie. Daarom is het nodig het aardgasnet te ‘ontkolen’ door de introductie van waterstof. Internationale standaarden voor aardgas zijn goed ontwikkeld, maar nog niet aangepast aan het gebruik van met waterstof verrijkt aardgas of zuiver waterstof.

Een van de doelen van dit project is het ontwikkelen van een metrologische infrastructuur voor debietmetingen van waterstof en met waterstof verrijkt aardgas, zodanig dat deze metingen voldoen aan de vereisten van het EU Measuring Instruments Directive (MID). In verband met de manier waarop een deel van de beschikbare waterstof wordt gegenereerd (omvormen van methaan, waarbij koolstofdioxide vrijkomt), is ook de bemetering van koolstofdioxide van belang. Hierbij moet worden voldaan aan de eisen van het EU Emissions Trading System. In dit kader wordt gewerkt aan het ontwikkelen van referentiematerialen voor kritische verontreinigingen in waterstof om de uiteindelijke kwaliteit van het verbrandingsgas te kunnen waarborgen en het ontwikkelen van meetmethoden voor verontreinigingen in koolstofdioxide. Dit is nodig voor zowel de opslag van koolstofdioxide, zowel als het hergebruik van koolstofdioxide als grondstof in de chemische industrie.

Dit project bouwt verder op de kennis uit het EMPIR-project 18NRM06 NewGasMet dat liep van 2019-2022.

Binnen dit project richt VSL zich op:

- Op kleine schaal testen van het effect van waterstof en met waterstof verrijkt aardgas op de nauwkeurigheid van flowmeters, inclusief het organiseren van een vergelijking met een of meerdere partners.
- Op kleine schaal testen van het effect van koolstofdioxide en onzuiverheden in koolstofdioxide op de nauwkeurigheid van flowmeters, inclusief een vergelijking met een of meerdere partners.
- Realiseren van standaarden voor waterstof Grade A en van analysemethoden voor onzuiverheden, zodat de kwaliteitseisen voor CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage) geborgd kunnen worden.
- Het ontwikkelen van referentiegasstandaarden voor koolstofdioxide; er worden in eerste instantie twee verontreinigingen getest.
- Een methode om specifieke verontreinigingen in koolstofdioxide met FTIR te meten.
- Een vergelijking m.b.t. commerciële analyzers voor het meten van waterstof in met waterstof verrijkt aardgas om de prestatiekenmerken voor dit soort instrumenten te vergelijken.
- Een studie om de inzetbaarheid van sorption tubes voor het meten van verontreinigingen in koolstofdioxide te bepalen, inclusief een peer-reviewed publicatie.

Technische voortgang in 2024:

Het flowvergelijk voor hydrogen enriched natural gas (HENG) is afgerond, de onzekerheid is bepaald en de resultaten zijn gerapporteerd. De stabiliteitsonderzoeken voor gasstandaarden voor waterstof grade A zijn afgerond. Dit resulteerde in 0,5 % onzekerheid voor de componenten CO, N₂ en CH₄ en

10 % voor H₂O bij een stabiliteit van twee jaar. Het vergelijk van industriële on-line analysers voor HENG met twee instrumenten is afgerond met tevreden deelnemers. Het ontwikkelen van de analysemethode met FT-IR voor onzuiverheden in CO₂ is afgerond en gepresenteerd op het GAS2024 gasanalyse symposium in Parijs. De analyse van NO₂ in CO₂ kan uitgevoerd worden met een onzekerheid van 2 % en de analyse van CO kan uitgevoerd worden met een onzekerheid van 3 %. Tevens is duidelijk geworden dat voor de CO-analyse het matrix gas CO₂ grote invloed heeft en daar dus voor gecorrigeerd moet worden, terwijl voor de NO₂-analyse juist de aanwezige hoeveelheid water grote invloed heeft maar het matrixgas CO₂ juist heel weinig.

Presentaties in 2024:

- Feasibility of measuring impurities' content in CO₂ with FT-IR Spectroscopy; Januari 2024; GAS2024; Parijs
- Metrology for decarbonising the gas grid WP2- Gas composition; Final Stakeholder Workshop; May 2024; Londen

4.1.2 Opschalen van waterstofproductie (HyScaling)

Projectdoel: Het in kaart brengen van de test- en validatiecondities van gassensoren en flowmeters die gebruikt worden in elektrolysesystemen, ter ondersteuning van het opschalen van de productie van waterstof.

Looptijd: Juni 2021 – juli 2024

Het is de verwachting dat aan het einde van dit decennium wereldwijd jaarlijks tientallen GW elektrolysecapaciteit zal zijn ontwikkeld t.b.v. de productie van waterstofgas als duurzame brandstof voor voertuigen, waarvan tot 4 GW in Nederland. Op dit moment is de Nederlandse industrie niet toegerust op zulke grote hoeveelheden elektrolytisch vermogen. Ook is er een sterke verscheidenheid aan technologieën, waarvan nog niet duidelijk is welke de “winnaar” gaat zijn. Het veld is sterk in ontwikkeling.

Het HyScaling-project, een onderdeel van het RvO MOOI-programma, heeft twee hoofddoelen om de snelle ontwikkeling en implementatie van de waterstoftechnologie te ondersteunen:

- Het maken van betere elektrolysesystemen (verbetering en kostenreductie van de technologie).
- Het verbeteren van de productie van elektrolysesystemen (vergroten van de productiecapaciteit).

Het HyScaling-project zal de volgende producten opleveren:

- Verbeterde elektrolysesystemen voor alle schalen (kW – GW) gerelateerd aan op de markt gerichte ‘use cases’.
- Verbeterde componenten en assemblages voor Polymer Electrolyte Membrane (PEM) en alkaline elektrolyzers.
- Verbeterde stackontwerpen.
- Innovatieve en verbeterde methodes voor hoge productiecapaciteit elektrolysesystemen.

VSL richt zich op het in kaart brengen van de test- en validatiecondities van gassensoren en flowmeters die gebruikt worden in elektrolysesystemen. VSL zal op basis van een gap-analyse en een nieuwe roadmap aanbevelingen doen over de te gebruiken sensoren en flowmeters in elektrolysesystemen in verschillende ‘use cases’, waarbij ook naar kostenefficiëntie zal worden gekeken.

Technische voortgang in 2024:

In januari is de laatste input verstuurd, waarmee TNO en ISPT de roadmap hebben kunnen afronden. Met deze bescheiden (in-kind) bijdrage is het gelukt om aansluiting te vinden bij de H₂-stakeholders om in nieuwe onderzoeksprojecten financiering te vinden om mee te werken aan de metrologische

uitdagingen. In juni is deelgenomen aan de afsluitende presentatie die als onderdeel van de waterstof innovatiedag op de agenda stond.

Publicaties in 2024:

- Publicatie “Verlaag de kosten van waterstofproductie door investeringen in nieuwe meetapparatuur”, 19/02/2024 [<https://ispt.eu/news/verlaag-de-kosten-van-waterstofproductie-door-investeringen-in-nieuwe-meetapparatuur/>]
- LinkedIn post: <https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7165610566391169024>

4.1.3 Green Transport Delta – Waterstof (GTD-H)

Projectdoel: Het realiseren van kalibratiefaciliteiten waarmee kwaliteit en kwantiteit van de afgeleverde hoeveelheid waterstof ten behoeve van duurzame mobiliteitstoepassingen nauwkeurig kan worden bepaald.

Looptijd: September 2021 – augustus 2025

Om de klimaatdoelen te behalen zijn er diverse ontwikkelingen gaande om de mobiliteitssector te verduurzamen. Waterstof vormt een belangrijke pijler in deze transitie. Het project Green Transport Delta (GTD) – Waterstof richt zich op het opzetten van een innovatief ecosysteem waarin Research & Development (R&D) gericht wordt op diverse veelbelovende waterstoftechnologieën. Het projectconsortium bestaat uit 20 partners, waaronder fabrikanten van trucks en/of onderdelen (o.a. DAF, GINAF, Bosal), meetinstrumenten (Bronkhorst, Krohne, Hobré), tankinfrastructuur (Resato) en onderzoeksorganisatie TNO.

Het hoofddoel van het project is het ontwikkelen van drie waterstof gerelateerde technologieën: waterstofverbrandingsmotoren, waterstofbrandstofcellen en de technologie voor een volgende generatie waterstoftankinfrastructuur. Deze drie hoofdontwikkelingen worden in dit project gerelateerd aan cross-sectorale mobiliteitstoepassingen voor de automotive, scheepvaart en non-road mobile machinery en de daaruit voorkomende technische vereisten die aan de producten worden gesteld vanuit de eindgebruiker. Hierbij wordt ook rekening gehouden met wet- en regelgeving en andere marktspecifieke factoren. Hiermee willen de consortiumpartners de transitie naar duurzame mobiliteit versnellen en verbeteren en hun (internationale) concurrentiepositie op de markt voor duurzame mobiliteitstoepassingen en powerunits versterken.

Voor VSL ligt de inzet op het gebied van de realisatie van kalibratiefaciliteiten waarmee kwaliteit en kwantiteit van de afgeleverde hoeveelheid waterstof nauwkeurig kan worden bepaald. VSL richt zich op het werkpakket “waterstoftankinfrastructuur” en is hier tevens de werkpakketleider van. Bij tankstations is het van belang zowel de afgeleverde hoeveelheid als de kwaliteit van de waterstof nauwkeurig te kunnen meten. VSL ontwikkelt hiervoor de benodigde kalibratiefaciliteiten, terwijl de overige partners nieuwe meetinstrumenten voor dit doeleinde ontwikkelen en tankprotocollen verbeteren. Hiermee kunnen tankstationhouders aantonen dat ze aan de gestelde eisen (uit geldende normen en wetgeving) voldoen. Dit bevordert zowel de eerlijke handel als de levensduur van waterstofvoertuigen, die hoofdzakelijk voorzien zijn van brandstofcellen die beschadigd kunnen raken door waterstof van onvoldoende kwaliteit.

Technische voortgang in 2024:

De kalibratiefaciliteit voor fast-filling (mastermeter) is ontworpen. Alle onderdelen zijn besteld en geleverd. Er heeft een stagiaire meegewerkt aan het project. Er zijn uitvoerige testen gedaan om de invloed van temperatuur op het nulpunt van de meter te bepalen (een belangrijke onzekerheidsbron), alsook testen om de flowmeter te kalibreren met 50 bar stikstof (vergelijkbare dichtheid als 700 bar waterstof). Hieruit blijkt dat de gewenste onzekerheid naar alle waarschijnlijkheid haalbaar is. De assemblage van de kalibratiefaciliteit zal begin 2025 gereed zijn.

De prototype flowmeter van projectpartner Bronkhorst is getest, met behulp van HyQS, bij een vulstation van projectpartner Resato Hydrogen Technology.

Een prototype portable gas calibrator is opgebouwd (met de in 2023 bestelde onderdelen) om onzuiverheden in waterstof te genereren. Het systeem is getest op lekkage en de flow controllers zijn gekalibreerd met stikstof, waterstof en argon. Er zijn mengsels gegenereerd van zwavels en stikstof in waterstof op respectievelijk 4 ppb en 300 ppm (rond de specificatiewaarde). De generatie is door middel van een analyser geverifieerd tegen gravimetrische referentiematerialen (VSL) of referentiematerialen van andere NMI's, met goede resultaten. De finale assemblage, met geautomatiseerde kleppen, wordt begin 2025 uitgevoerd.

4.1.4 Metrologie voor het achtergrondniveau van CO₂ in lucht

Projectdoel: Het opzetten van een metrologische infrastructuur voor metingen van het achtergrondniveau van koolstofdioxide in lucht.

Looptijd: 2022-2025

Monitoring van de molfractie koolstofdioxide in de atmosfeer is essentieel voor het bestuderen van de effecten van dit broeikasgas op weer en klimaat. De laboratoria van de Wereld Meteorologische Organisatie (WMO) onderhouden zelf een meetschaal voor de molfractie CO₂ die niet geheel overeenkomt met de schaal die door de NMI's wordt onderhouden en die voor het laatst in CCQM-K120 is vergeleken. Belangrijkste bezwaar van de WMO is dat de schaal die door de NMI's wordt onderhouden is gebaseerd op gravimetrische bereiding van gasmengsels en dat de onderlinge verschillen tussen deze standaarden groter zijn dan de reproduceerbaarheid van metingen van de molfractie CO₂ in lucht. Het BIPM werkt hierom aan het opzetten van een koolstofdioxideschaal tussen 380 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ en 800 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, op basis van twee sets van negen standaarden, op basis van gravimetrie, manometrie en laser spectroscopie.

VSL is uitgenodigd om expertise in te brengen op het vlak van meerpuntskalibratie en het fitten van curves door data. Daarnaast wordt er een database opgezet waarin voor deze toepassing relevante data FAIR beschikbaar worden gemaakt.

Technische voortgang in 2024:

Van BIPM is een eerste dataset ontvangen, waarop regressieanalyse is uitgevoerd. Verder is er een Python-script aan BIPM verstrekt voor de database. Aan de onzekerheidsstructuren van de data wordt verder gemodelleerd.

4.1.5 Validatie van biomethaan conformity assessment (BiometCAP)

Projectdoel: Het ontwikkelen van referentiematerialen en meetmethoden voor de validatie van analytische meetinstrumenten en procedures voor de conformity assessment van biomethaan. Het ontwikkelen van een protocol voor evaluatie van gasanalysers die worden gebruikt voor de conformity assessment van biomethaan.

Looptijd: Oktober 2022 – september 2025

De algemene EU-doelstelling voor het gebruik van hernieuwbare energiebronnen tegen 2030 is in de RED II-richtlijn verhoogd naar 32 %. De conformiteitsbeoordeling van biomethaan vereist verdere standaardisatie om de toekomst van hernieuwbare energie in Europa te ondersteunen. Het algemene doel van dit project is de ontwikkeling van een normontwerp ter ondersteuning van de herleidbaarheid, betrouwbaarheid en bepaling van de prestatiekenmerken van meetmethoden te bieden die nodig zijn voor de conformiteitsbeoordeling van biomethaan (groen gas).

Dit project zal zorgen voor toegankelijke herleidbaarheid voor de industrie en laboratoria door efficiënte en kosteneffectieve methoden te ontwikkelen voor het opstellen van herleidbare gasvormige referentiematerialen voor de prestatie-evaluatie van biomethaan monitoringsystemen. Aan de hand hiervan zal een robuust evaluatieprotocol worden ontwikkeld en gevalideerd om analytische systemen (bijv. gasmonitoren) te benchmarken en te karakteriseren. De resultaten, inclusief demotoepassingen, zullen worden aangeboden aan de standaardisatie. Dit project zal de kloof overbruggen tussen eerder

ontwikkelde primaire gasstandaarden en de behoefte van de industrie aan toegankelijke, herleidbare prestatie-evaluatie aan de hand van een gevalideerd en erkend protocol.

VSL leidt het werkpakket voor het creëren van impact, dat verspreidings- en communicatieactiviteiten omvat, evenals de exploitatie, overdracht en acceptatie van de projectresultaten. In een van de technische werkpakketen zal VSL gravimetrische en dynamische gasstandaarden aanmaken en valideren om te gebruiken voor de prestatie-evaluatie van analytische systemen en zal het de dynamische bereidingsfaciliteit optimaliseren. In een andere werkpakket zal VSL samen met andere partners werken aan de ontwikkeling van een uitgebreid protocol voor de validatie en prestatie-evaluatie van de analytische instrumenten en methoden die worden gebruikt bij de conformiteitsbeoordeling van biomethaan. VSL zal ook bijdragen aan de validatie van het protocol door de toepasbaarheid aan te tonen voor de bepaling van geselecteerde prestatiekenmerken.

Dit zal leiden tot uitbreiding van diensten voor kalibratie van gasmengsels en instrumenten en van evaluatie van analytische systemen voor biomethaanconformiteitsbeoordeling. Het organiseren van ringonderzoeken voor biomethaanconformiteitsbeoordeling volgens een uitgebreid protocol wordt mogelijk. Tot slot zal de positie van VSL als organisatie waar belanghebbenden naartoe gaan voor testen op biogas/biomethaan versterkt worden.

Technische voortgang in 2024:

In 2024 zijn er diverse tests uitgevoerd met de dynamische verdunningsfaciliteit met verschillende combinaties van gasmatrixen. Met behulp van deze (in een eerder EMPIR-project Biogas gebouwde) faciliteit is een zwavelanalyser (GC-SCD) gekalibreerd, waarbij de resultaten zijn vergeleken met statische gravimetrische mengsels.

Het protocol is ontwikkeld voor de evaluatie van gasanalysers die worden gebruikt voor de conformiteitsbeoordeling van biomethaan. Validatietests voor verschillende parameters zijn gestart. VSL heeft hiervoor de metingen voor siloxanen, HCl en NH₃ afgerond en zal dit in januari 2025 rapporteren.

Presentaties in 2024:

- Introduction and progress of the project presented at the EURAMET TC-MC meeting in February 2024
- Introduction and progress of the project presented at the ISO/ TC193/ SC1/ WG25 meeting on 2 April 2024
- Introduction and progress of the project presented at the NEN 310408 meeting on 4 April 2024
- BiometCAP project introduction at the webinar (online) on 'Sampling' held on 17 April 2024
- BiometCAP WP4 progress presentation at the workshop (hybrid) held on 22 April 2024
- Improving access to traceability: Novel reference standards for biomethane analyser performance evaluation, REGATEC 2024 conference, 15-16 May 2024, Lund, Sweden

4.1.6 Metrologie voor CCUS (MetCCUS)

Projectdoel: Het identificeren van de belangrijkste metrologische uitdagingen op het gebied van Carbon Capture, Utilisation and Storage (CCUS) en het ontwikkelen van een eerste set primaire standaarden, meetmethodes en good practice guides.

Looptijd: Oktober 2022 – september 2025 (met aanvullend 60 dagen als coördinator voor de eindrapportage)

In het kader van de Europese "Green Deal" dient de jaarlijkse uitstoot van CO₂ in 2030 met 55% gereduceerd te zijn ten opzichte van 1990. CO₂ afvang, gebruik en opslag is noodzakelijk om in 2050 in het geheel CO₂-neutraal te zijn. Het behalen van CO₂-reductiedoelstellingen, het transporteren en gebruiken van CO₂ in industriële processen en het verhandelen van CO₂ in lijn met het EU Emissions Trading System (EU ETS), vereist een metrologische infrastructuur voor betrouwbare zuiverheids- en hoeveelheidsmetingen van CO₂. Het hoofddoel voor het gehele onderzoek consortium is het verrichten

van onderzoek naar en het ontwikkelen van metrologische infrastructuur benodigd voor CO₂-afvang, -gebruik en -opslag op industriële schaal.

VSL richt zich in dit project op de volgende drie doelen:

- Ontwikkelen van herleidbaarheid en vaststellen van te bereiken meetonzekerheid voor CO₂-transport (flow) op industriële schaal, voor vloeibaar en gasvormig CO₂.
- Onzekerheidsrekening aan de toestandsvergelijkingen voor CO₂, waarbij rekening gehouden wordt met typisch voorkomende onzuiverheden in de CO₂.
- Ontwikkelen van primaire gasmengsels die nauwkeurige zuiverheidsmetingen aan CO₂ mogelijk maken.

VSL coördineert het project en is werkpakketleider voor het ontwikkelen van primaire gasmengsels en nauwkeurige zuiverheidsmetingen.

Hiermee wordt het volgende bereikt :

- Kennisdisseminatie naar standaardisatiecommissies (ISO/TC 265 “Carbon dioxide capture, transportation, and geological storage”, NEN), belangengroepen (“Zero emission platform”) en relevante stakeholders.
- Ondersteunen Nederlandse industrie door het ontwikkelen van benodigde metrologische infrastructuur voor CO₂-afvang, -transport, -gebruik en -opslag.
- Nieuwe of verbeterde faciliteiten voor het uitvoeren van flowmeter kalibraties.
- Referentiematerialen voor het meten van verontreinigingen in CO₂.

Technische voortgang in 2024:

VSL heeft de flowfaciliteiten klaar gemaakt voor gebruik met CO₂ en de metingen uitgevoerd voor het bepalen van de overdraagbaarheid van flowmeterkalibraties tussen CO₂ en alternatieve gasen zoals aardgas. Een debietmeter is gekalibreerd met CO₂ en N₂ tot 3 m³/h. Daarnaast is er een eerste versie van het protocol geschreven voor het vergelijken van gasstromen tot 30 m³/h bij atmosferische druk met pure CO₂. Het rapport “current state of the art of traceable liquid CO₂ flow measurement and liquid CO₂ primary standard requirements” is gepubliceerd.

Voor de chemische samenstelling van CO₂ zijn verschillende gasmengsels gemaakt (NO₂ in CO₂, SO₂ in CO₂ en H₂O in CO₂). De stabiliteit van deze mengsels is tot aan het einde van het jaar gevolgd. Daarnaast is er een dynamische methode voor het maken van gasmengsels met permanente gasen (N₂, H₂, CO, CH₄, O₂ en Ar) in CO₂ ontwikkeld en gevalideerd. Tegelijkertijd is een methode ontwikkeld voor de analyse van deze gasmengsels met gaschromatografie. Het protocol voor de round robin is naar de deelnemers gestuurd zodat de round robin zelf in 2025 kan worden uitgevoerd. VSL coördineert dit project en in mei is de eerste versie van de 1^e periodieke rapportage ingeleverd.

Publicaties in 2024:

- Current state of the art of traceable liquid CO₂ flow measurement and liquid CO₂ primary standard requirements (<https://zenodo.org/records/11118645>).

Presentaties in 2024:

- Metrological analysis of impurity level in CO₂ captured, IEAGHG expert workshop: comparative technoeconomic assessment of commercially available CO₂ conditioning technologies, 20-2-2024, online (<https://www.youtube.com/watch?v=iqSNSMwxVT4>).
- Metrology support for carbon capture utilisation and storage, EURAMET TC-Flow, 23-4-2024.

4.1.7 Waterstofbemonstering voor zwaar transport (MetHyTrucks)

Projectdoel: Het ontwikkelen van protocollen voor het nemen van representatieve monsters voor waterstofkwaliteitsanalyse ten behoeve van gebruik als brandstof in de transportsector.

Looptijd: Juni 2023 – mei 2026

Het gebruik van waterstof als brandstof voor bussen en vrachtwagens neemt snel toe. Deze sector is één van de belangrijkste pijlers van de waterstofindustrie, zoals vastgelegd in de Hydrogen Europe roadmap voor emissievrij transport in Europa in 2050. Dit project heeft tot doel wetenschappelijk bewijs te leveren voor de standaardisatie van waterstofbemonstering voor toepassingen in de transport sector.

Binnen dit project richt VSL zich op:

- Validatie van bemonsteringsmethodologie voor waterstofstations.
- Ontwikkeling van protocollen en richtlijnen voor het nemen van samples waterstof van heavy duty hydrogen refilling stations (HD HRS).
- Disseminatie van resultaten naar bijv. ISO/TC158 en EMN Energy gases.

Voor VSL staat de kennisopbouw en samenwerking met de industrie voor de waterstof sampling centraal. Dit is momenteel een belangrijke missing-link voor het aanbieden van waterstof zuiverheidsanalyse aan producenten en/of gebruikers voor waterstof.

Technische voortgang in 2024:

Er is een plan gemaakt voor het testen van kritische parameters voor het bemonsteren van waterstof en dit is besproken met projectpartner NPL. Cilinders voor deze testen zijn, met enige vertraging, geleverd. De experimenten zijn inmiddels afgerond maar wel met vertraging. Er is een begin gemaakt met de data analyse en dit wordt afgerond begin 2025. Samen met projectpartners wordt gewerkt aan het draft protocol voor het valideren van sampling systemen voor waterstofkwaliteit.

Er is een presentatie gehouden op Gas Analysis Event 2024 in Parijs. Verder is er een poster gepresenteerd op EGATEC 2024 door VSL. Tevens is een workshop georganiseerd op 12 november bij VSL ([Link naar LinkedIn post](#)) met onder andere presentaties vanuit ISO TC197. Tenslotte werd een presentatie gehouden tijdens het Webinar ‘*Extending quality control from LD to HD conditions*’.

Publicaties in 2024:

- K Arrhenius, O Büker, S Hultmark, T Bacquart, T Aarhaug, S Persijn, D. van Workum, S. Kaiser, M. Dufond, E. Basset, R. Maury, *Parameters affecting the reliability of sampling during the assessment of the purity of hydrogen used as a vehicle fuel*, Measurement: Sensors, 101771 <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101771> (in druk)
- K. Arrhenius, T. Bacquart, T. Aarhaug, S. Persijn, O. Büker, D. van Workum, A. Baldan, S. Kaiser, M. Dufond, Q. Nouvelot, R. Maury, *Hydrogen sampling systems adapted to heavy-duty refuelling stations' current and future specifications—A review*, Energy Reports 12, 3451-3459, December 2024, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.09.032>

Presentaties in 2024:

- Presentatie: “Measurement of impurities in hydrogen using LEDs and lasers”, bij Gas Analysis Event 2024, Parijs
- Poster presentatie gehouden K. Arrhenius, O. Büker, T. Bacquart, T. Aarhaug, S. Persijn, I. de Krom, T. Sarac “Metrology to support standardisation of hydrogen fuel sampling for heavy duty transport” op 6th European Gas Technology Conference (EGATEC, 18-19 juni 2024, Hamburg)
- Presentatie S. Persijn ‘On the road to standardization: A sampling protocol specific for HD’. Webinar ‘Extending quality control from LD to HD conditions’, 10 December 2024

4.1.8 Waterstof transport, offshore en opslag (HyTROS)

Projectdoel: Het ontwikkelen van de metrologische infrastructuur met betrekking tot waterstofkwaliteit en waterstofhoeveelheid die nodig is voor de transitie van het huidige aardgasnetwerk naar waterstof.

Looptijd: 2024-2029

Nederland is momenteel, na Duitsland, Europa’s tweede grootste waterstofproducent, met een jaarlijkse productie van meer dan 10 miljard m³ waterstof per jaar, hoofdzakelijk voor ammoniakproductie. Echter, deze waterstof is vrijwel 100% afgeleid van fossiele brandstof, met

ongeveer 13 Mton CO₂-emissies als gevolg. Om grote-schaalproductie van koolstof-neutrale waterstof (i.e. groene waterstof) mogelijk te maken is in Nederland 4 GW electrolyzercapaciteit voorzien in 2030. Een grote uitdaging bij het opschalen van de waterstof productie zal zijn om te onderzoeken of, en hoe, de huidige on- en offshore aardgas infrastructuur gebruikt kan worden voor de waterstoftransitie.

Het Groenvermogen project, opgedeeld in een serie van zeven werkpakketten, wordt ingezet voor het versnellen van de ontwikkeling van de “National hydrogen backbone”. De hele keten van belanghebbende industrieën, gebruikers, producenten, werken hierbij samen. In WP2, het eerste uitgevoerde werkpakket in de serie van zeven, is de aandacht gericht op de infrastructuur, off-shore productie en opslag, met overkoepelend daar omheen veiligheidsaspecten en upscaling en system integration.

VSL richt zich op de metrologische infrastructuur met betrekking tot waterstof kwaliteit en waterstof hoeveelheid. Voor kwaliteit zal gewerkt worden aan referentiematerialen (gasmengsels in cilinders en dynamische verdunningsmethodes) voor nog nader vast te stellen onzuiverheden. Voorts wordt met o.a. HAN, HANZE, RUG, Radbout en TNO samengewerkt aan het ontwikkelen en testen van multicomponent analyse en sensoren.

Voor debietmeting wordt met o.a. DNV samengewerkt aan het onderzoek van het gedrag van waterstof onder verschillende condities bij verschillende types flowmeters.

Technische voortgang in 2024:

Het project is van start gegaan in maart van dit jaar. De officiële kick-off meeting in Amersfoort is bijgewoond en kick-off meetings zijn georganiseerd voor de activiteiten waarbij VSL betrokken is als co-lead voor het werkpakket Infrastructuur.

De PhD student bij de RU Nijmegen is samen met VSL en de stakeholders in oktober gestart met de literatuurstudie en met de daaruit volgende gap-analyse. Op basis daarvan is inmiddels NH₃ in waterstof gekozen als eerste target component voor VSL voor de ontwikkeling van nieuwe referentiematerialen. De eerste mengsels zijn hiervoor inmiddels gemaakt. De resterende mengsels en de eerste analyses volgens in Q1 van 2025. Daarmee past de voortgang nog binnen de eerder afgesproken planning.

4.1.9 Ontwikkeling nieuwe vermogens- en energiemeetsystemen

Projectdoel: Het ontwikkelen van nieuwe meetsystemen voor batterijen, efficiëntie van energieconversie en metingen in elektriciteitsnetten

Looptijd: 2021-2026

Elektrificatie van energieopwekking en energieverbruik in onder andere transport is een kernonderdeel van de Energie Transitie naar een duurzame energievoorziening. Deze elektrificatie drijft een heel aantal innovaties in onder andere slimme elektriciteitsnetten, energieopslag en elektrisch vervoer. In elk van deze thema's spelen metingen een belangrijke rol: nieuwe meetapparatuur en meetmethoden zijn nodig voor het monitoren en controleren van netstabiliteit en netkwaliteit, voor het karakteriseren van batterijen en voorspellen van hun levensduur, en voor het evalueren van de efficiëntie in de vele energieconversie stappen die gemaakt worden tussen de generatie van elektriciteit en het eindgebruik.

In dit project werkt VSL samen met onderzoekers van de Universiteit Twente (UT) aan realisatie van nieuwe meetsystemen voor karakterisatie van batterijen, efficiëntiemeting van energieconversie en metingen van kwaliteit en stabiliteit in elektriciteitsnetten. De beoogde meetsystemen zijn:

- Meetopstellingen voor het meten van efficiëntie van vermogensconverters in bijvoorbeeld DC onderstations (on-site), hoogvermogen verlichtingsarmaturen en laadstations voor elektrische auto's met een onzekerheid van beter dan 2 %.
- Calorimeter voor meting van de efficiëntie van ultra-efficiënte vermogensconverters met een nauwkeurigheid van beter dan 1 %.
- Meetsystemen voor bepaling van de state-of-charge (SOC) en state-of-health (SOH) van batterijen op basis van Electrical Impedance Spectroscopy (EIS) met een onzekerheid van

beter dan 3 %, inclusief AI methoden om aan de hand van de meetresultaten voorspellingen te doen over de batterijcapaciteit.

De nieuwe meetfaciliteiten versterken de uitrol en hergebruik van batterijen voor energieopslag, helpen de Nederlandse vermogenselektronica industrie om state-of-the-art elektronica te ontwikkelen met aantoonbaar hoge efficiëntie en lage verliezen, en ondersteunen de ontwikkeling van elektriciteitsnetten die in staat zijn om grote hoeveelheden duurzame energie (wind, zon) op te nemen en te transporteren. VSL ondersteunt daarmee de elektrificatie van onze samenleving als onderdeel van de energietransitie.

Technische voortgang in 2024:

Een eerste prototype van de nieuwe calorimeter is gebouwd en een groot aantal testmetingen zijn vervolgens uitgevoerd. Deze testen hebben een 'proof of principle' gegeven van het nieuwe ontwerp. Deze resultaten zijn op de CPEM2024 conferentie gepresenteerd.

Bij de testen van de calorimeter kwamen een aantal beperkingen naar boven van het huidige ontwerp. Allereerst bleek dat extra koeling nodig was voor goed functioneren van de calorimeter; hiervoor is door de UT een koeler aangeschaft. Vervolgens is een verbeterd ontwerp gemaakt van de calorimeter met extra isolatie voor beperking van negatieve invloeden van de omgeving zoals temperatuurvariaties. De componenten voor realisatie van dit ontwerp zijn aangeschaft en de bouw is in een vergevorderd stadium.

Ten behoeve van de elektrische meting van de efficiëntie van vermogensconverters en de componenten daarin (schakelaars, capaciteiten, inducties) zijn door de UT een aantal breedbandige stroom- en spanningssensors aangeschaft. Verder is er een ontwerp gemaakt van een speciale vermogensconverter waarin een combinatie van Si- en SiC-schakelaars moet zorgen voor een reductie van de schakelverliezen.

Op het gebied van vermogensconverters zijn verder drie journal papers en twee conferentiebijdragen geschreven. Een paper richtte zich op toepassing van AI-technieken voor het modelleren van verliezen in magnetische materialen in vermogensconverters. Een andere journal paper betrof onderzoek in samenwerking met TU Delft voor het realiseren van een "arbitrary waveform" hoogspanningsgenerator.

Tenslotte zijn er in het batterijenonderzoek zijn vier journal papers gepubliceerd: naast een review paper over de uitdagingen van hergebruik van batterijen, een drietal papers over het gebruik van AI/ML technieken voor het bepalen van gezondheid (State of Health, SOH) en veroudering van batterijen. Op basis van de resultaten in deze papers zijn VSL en UT uitgenodigd om deel te nemen in het HyMetBat projectvoorstel, wat inmiddels is goedgekeurd en in 2025 zal starten. De VSL / UT bijdrage aan dit project is het verwerken van grote hoeveelheden meetdata die inzicht geven in nieuwe batterijmaterialen.

Publicaties in 2024:

- Madhat Alimawi, Roelof Grootjans, en Gert Rietveld, "An Alternative Calorimetric Approach for Power Loss Measurement of Ultra-efficient Power Electronics," 2024 Conference Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2024), Denver, USA, pp. 1 – 2.
DOI: [10.1109/CPEM61406.2024.10646036](https://doi.org/10.1109/CPEM61406.2024.10646036)
- Weichuan Zhao, Sohrab Ghafoor, Gijs W. Lagerweij, Gert Rietveld, Peter Vaessen, Mohamad Ghaffarian Niasar, "Comprehensive Investigation of Promising Techniques to Enhance the Voltage Sharing among SiC MOSFET Strings, Supported by Experimental and Simulation Validations," Electronics 2024, 13, pp. 1 – 34 (2024).
DOI: [10.3390/electronics13081481](https://doi.org/10.3390/electronics13081481)
- Lei Wang, Wenbo Wang, Keqiu Zeng, Junyun Deng, Gert Rietveld, and Raymond J. E. Hueting, "Opportunities and Challenges of Pressure Contact Packaging for Wide Bandgap Power Modules," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 39, no. 2, pp. 2401 – 2419 (2024)
DOI: [10.1109/TPEL.2023.3332050](https://doi.org/10.1109/TPEL.2023.3332050)
- Junyun Deng, Wenbo Wang, Zhansheng Ning, Prasanth Venugopal, Jelena Popovic, and Gert Rietveld, "High-Frequency Core Loss Modeling Based on a Knowledge-Aware Artificial Neural Network," IEEE Transactions on Power Electronics, Letters, vol. 39, no. 2, pp. 1968 – 1973

(2024)

DOI: [10.1109/TPEL.2023.3332025](https://doi.org/10.1109/TPEL.2023.3332025)

- Lisheng Wang, Gert Rietveld, and Raymond J.E. Hueting, "A systematic comparison study of different bonding technologies for large substrate attachment of power electronics," PCIM Europe 2024: International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nürnberg, Germany, pp. 2055 – 2061 (2024)
DOI: [10.30420/566262290](https://doi.org/10.30420/566262290)
- Lei Wang, Wenbo Wang, Gert Rietveld, and Raymond J.E. Hueting, "Development of Pressure Contact Technology for Multi-chip SiC Modules with Low Parasitics," 2024 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Long Beach, CA, USA, pp. 202 – 209 (2024)
DOI: [10.1109/APEC48139.2024.10509116](https://doi.org/10.1109/APEC48139.2024.10509116)
- Seyedreza Azizighalehsari, Prasanth Venugopal, Deepak Pratap Singh, Thiago Batista Soeiro, and Gert Rietveld, "Empowering Electric Vehicles Batteries: a comprehensive look at the application and challenges of second-life batteries," Batteries 10 (5), 161, pp. 1 – 40 (2024)
DOI: [10.3390/batteries10050161](https://doi.org/10.3390/batteries10050161)
- Zhansheng Ning, Junyun Deng, Prasanth Venugopal, Thiago Batista Soeiro, and Gert Rietveld, "Partial-Range SOC-Insensitive Model With EIS Change Pattern Recognition Model for Battery Aging Estimation," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Early Access, pp. 1 – 12 (2024)
DOI: [10.1109/TIE.2024.3511086](https://doi.org/10.1109/TIE.2024.3511086)
- Zhansheng Ning, Prasanth Venugopal, Thiago Batista Soeiro, and Gert Rietveld, "Computation-light AI models for Robust Battery Capacity Estimation based on Electrochemical Impedance Spectroscopy," IEEE Transactions on Transportation Electrification, Early Access, pp. 1 – 12 (2024)
DOI: [10.1109/TTE.2024.3435455](https://doi.org/10.1109/TTE.2024.3435455)
- Seyedreza Azizighalehsari, Eduard Aguilar Boj, Prasanth Venugopal, Thiago Batista Soeiro, and Gert Rietveld, "A Distribution of Relaxation Time Approach on Equivalent Circuit Model Parameterization to Analyse Li-ion Battery Degradation", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 60, no. 6, pp. 9206 - 9215 (2024)
DOI: [10.1109/TIA.2024.3430268](https://doi.org/10.1109/TIA.2024.3430268)

Presentaties in 2024:

- Madhat Alimawi, Roelof Grootjans, en Gert Rietveld, "An Alternative Calorimetric Approach for Power Loss Measurement of Ultra-efficient Power Electronics," 2024 Conference Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2024), Denver, USA. (mondelinge presentatie)

4.1.10 Ondersteuning voor een EMN op het gebied van Schone Energie (CleanEnergy)

Projectdoel: Ondersteuning bieden bij het opzetten van een Europees Metrologie Netwerk (EMN) op het gebied van Schone Energie.

Looptijd: Mei 2021 – april 2024

In de EMN's op het gebied van slimme elektriciteitsnetwerken en op het gebied van energiegassen, beide opgezet onder leiding van VSL, worden niet alle onderwerpen op het gebied van de energietransitie behandeld. Om deze reden wordt er gewerkt aan een nieuw EMN op het gebied van Schone Energie (Clean Energy). Dit netwerk richt zich op de opwekking, opslag, conversie en het gebruik van schone energie. VSL brengt binnen dit netwerk haar ervaring op het gebied van EMN's in en kan zo bijdragen aan een harmonieuze manier van aanpak voor de drie energie-EMN's. Daarnaast zal VSL bijdragen aan de afstemming tussen de werkgebieden en het opzetten van gezamenlijke initiatieven, bijvoorbeeld op het gebied van stakeholderbenadering.

De focus van VSL in dit project ligt op het definiëren van de scope van het toekomstige EMN, de samenstelling van de deelnemers aan het netwerk, de aansluiting met andere projecten en initiatieven op het gebied van schone energie, internationale samenwerking en de interne organisatie. Daarnaast

wordt een bijdrage geleverd aan het metrology landscape, de strategische research agenda en de strategische agenda.

Technische voortgang in 2024:

Het project is in april 2024 succesvol afgerond met de feitelijke oprichting van de EMN Clean Energy. VSL is lid geworden van dit EMN en zal de inspanningen daarvoor voortzetten onder infrastructuur. Voor de EPM call 2024 heeft de EMN een aantal brainstormsessies georganiseerd die tot nieuwe PRT's hebben geleid, waaraan VSL heeft bijgedragen.

4.1.11 Metrologie voor DC-netten (DC grids)

Projectdoel: Het definiëren en herleidbaar meten van DC Power Quality (DCPQ) parameters ter ondersteuning van standaardisatie bij de verdere ontwikkeling en toepassing van DC-netten.

Looptijd: Juni 2021 – mei 2024 (met aanvullend 60 dagen als coördinator voor de eindrapportage)

De meeste huishoudelijke apparaten gebruiken gelijkstroom. Ook duurzame technologieën, zoals LED-verlichting, zonnepanelen en elektrische voertuigen (EV's), werken op gelijkstroom. Adaptoren met de bijbehorende energieverliezen zijn onvermijdelijk wanneer ze op ons traditionele wisselspanningsnet moeten worden aangesloten. De opkomst van hernieuwbare en duurzame technologieën heeft de interesse in gelijkspanningsnetten als mogelijk alternatief of als aanvulling op het bestaande net vergroot. De potentiële toepassingen van gelijkspanningsnetten zijn zeer breed, variërend van woningen en bedrijfsgebouwen tot ziekenhuizen, landbouw, verlichting, elektrisch vervoer, datacenters en telecommunicatie.

De normalisatie van gelijkspanningsnetten richt zich momenteel op installatie, bedradingsvoorschriften, veiligheid voor gebruikers (schokken, brandwonden) en apparatuur (ontladingen), spanningsniveaus en de detectie van storingen. De voor gelijkspanningsnetten vereiste metrologie-infrastructuur ontbreekt momenteel echter volledig. Voor traditionele wisselspanningsnetten zijn de spanningskwaliteit (PQ) en de betrouwbaarheid van elektriciteitsmetingen goed geregeld en gestandaardiseerd, terwijl dit voor gelijkspanningsnetten nog in de kinderschoenen staat.

Het EMPIR project DC grids heeft als doel om deze problemen aan te pakken, als reactie op behoeften die door de normalisatiecommissies CLC TC8X WG01 en IEC TC13 WG20 zijn geformuleerd. Het doel van het project is de herleidbaarheid en karakterisering van PQ-parameters ter ondersteuning van standaardisatie bij de verdere ontwikkeling en het gebruik van gelijkspanningsnetten en om het vertrouwen van de klant in de toekomst te waarborgen.

VSL coördineert dit project, waarbij we ons richten op twee belangrijke technische aspecten. Het eerste aspect is het ontwikkelen van meetapparatuur en het uitvoeren van onsite metingen in operationele DC-netten, zodat we weten wat voor soort verstoringen zich in de praktijk voordoen in echte DC-netten. Het tweede aspect is het ontwikkelen van een referentiesysteem voor het testen van DC-elektriciteitsmeters in de aanwezigheid van zulke echte storingen en tegelijkertijd te zorgen voor de herleidbaarheid van deze PQ-verschijnselen.

Technische voortgang in 2024:

Over de resultaten van de veldmetingen door VSL in een DC-net in een parkeergarage in Utrecht eind vorig jaar met de Hogeschool van Amsterdam is een conferentiepapier gepresenteerd op de I2MTC 2024 in Glasgow. Daarnaast is samen met de universiteit van Campania een journal paper geschreven over een statistische analyse van dezelfde metingen (nog niet gepubliceerd). De universiteit van Strathclyde heeft deze meetdata ook geanalyseerd, als onderdeel van een master thesis.

De VSL DCPQ-opstelling is verder afgerond en gevalideerd middels een vergelijk met METAS met hulp van een transferstandaard ontwikkeld door INRIM. De focus van deze vergelijkende metingen lag bij DC-ripple van single-tone en driehoekige vervormingen en bij dips en swells. Over de resultaten van dit vergelijk is een gezamenlijke conferentiepapier geschreven; deze zal worden gepresenteerd op de AMPS 2024 in Napels.

Eind mei heeft VSL ter afsluiting van het project een zeer succesvolle stakeholder workshop van een hele dag georganiseerd als onderdeel van een tweedaags stakeholder event bij VSL in samenwerking met de EMN Smart Electricity Grids. In totaal waren op beide dagen ongeveer 35 personen fysiek aanwezig bij VSL en daarnaast ruim 100 online. Naast presentaties van het projectconsortium waren ook een aantal presentaties van stakeholders over metingen in DC-netten.

Aansluitend aan de stakeholder workshop vond de afsluitende interne project meeting plaats. Als coördinator van het project heeft VSL de eindrapportage in gang gezet, net als het afronden van de laatste deliverables. Ook is de project website <https://dc-grids.nl> geüpdatet.

Publicaties in 2024:

- H.E. van den Brom, R. van Leeuwen, J.M. Warmerdam, and R. Schaacke, "Power Quality Measurements in a Low-Voltage DC Microgrid in an Open Parking Garage," 2024 International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Glasgow, UK, 20-23 May 2024 [<https://doi.org/10.5281/zenodo.11384695>]
- A. Delle Femine, D. Gallo, H. E. van den Brom, C. Landi, M. Luiso, Ronald. van Leeuwen, "Assessment of quasi-stationary Power Quality phenomena in DC power systems", Measurement, Volume 242, Part A, 2025, 115844, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115844>
- G. Frigo, R. van Leeuwen, H. van den Brom, D. Signorino, D. Giordano, D. Gallo, and A. Delle Femine, "Inter-Laboratory Comparison of Reference Systems for DC Power Quality Measurements", IEEE 14th International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS), Caserta, Italy, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/AMPS62611.2024.10706676

Presentaties in 2024:

- Helko van den Brom, "Standardization of Measurements in Low-Voltage DC Grids", DC grids final workshop, Delft, the Netherlands, 16 May 2024 [<https://dc-grids.nl/downloads/>]
- Ronald van Leeuwen, "On-site measurements in LVDC grids", DC grids final workshop, Delft, the Netherlands, 16 May 2024 [<https://dc-grids.nl/downloads/>]
- H.E. van den Brom, "Power Quality Measurements in a Low-Voltage DC Microgrid in an Open Parking Garage," 2024 International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Glasgow, UK, 21 May 2024 [<https://i2mtc2024.ieee-ims.org/pdf-program>]

4.1.12 Metrologie voor digitale instrumenten in onderstations (Digital-IT)

Projectdoel: Het ontwikkelen van methoden voor de herleidbare kalibratie van Sampled Value (SV) apparatuur die gebaseerd is op de meest recente IEC- normen.

Looptijd: September 2022 – augustus 2025

Toekomstige elektriciteitsnetten zullen realtime controle- en bewakingssystemen nodig hebben om steeds uitdagendere omstandigheden het hoofd te kunnen bieden. Digitale instrumentatie vervangt in toenemende mate conventionele analoge instrumentatie. De belangrijkste voordelen van de nieuwe technologie zijn onder meer een hoog niveau van interoperabiliteit en integratie, verminderde complexiteit en kosten, dankzij eenvoudige onderlinge verbindingen in een onderstation en operationele flexibiliteit. Inzicht in de nauwkeurigheid van de digitale instrumentatie en hun vermogen om betrouwbare gegevens te leveren ontbreekt echter nog. Dit probleem wordt verergerd door het ontbreken van een volwassen kalibratie-infrastructuur voor traceerbare verificatie van de nauwkeurigheidsklassen van de digitale instrumenten. Dit project voorziet in de behoeften van fabrikanten van apparatuur, distributie- en transmissiesysteembeheerders, evenals IEC- en CENELEC-standaardisatiecomités, om ervoor te zorgen dat de volgende generatie instrumentatie voldoet aan de nauwkeurigheidseisen van netbeheerders. Het project bouwt voort op het werk in het eerdere EMPIR-project FutureGrid II.

VSL richt zich binnen dit project op het realiseren van een dienst om apparatuur die communiceert via het IEC-61850-9-SV protocol, zoals standalone merging units, te kunnen kalibreren volgens de normen

die daar voor gelden. Hiervoor wordt een meetopstelling gerealiseerd waarin zowel de amplitude en de tijdsdistributie is gegarandeerd, zodat het mogelijk is om apparatuur uit digitale onderstations te kalibreren.

Technische voortgang in 2024:

Voor de uitbreiding van de bandbreedte van de referentie-SAMU is ervoor gekozen om een commercieel apparaat te gebruiken. De WT5000 is een power meter die intern gesynchroniseerd is met PTP 1588 en die voldoende bandbreedte heeft voor het doel. Deze wordt nu ingezet als vervanging voor de referentie-SAMU.

Detail metingen van de performance van de synchronisatie van de WT5000 zijn verder onderzocht. Een gedetailleerde instructie voor deze kalibratie moet nog worden geschreven.

Ook is er gewerkt aan de uitbreiding van de generator. Er worden nu een viertal functiegeneratoren gebruikt om de signalen te genereren. Er wordt nog gezocht naar een goede versterker om de benodigde spanningen en stromen te maken. De software voor het verwerken van de SV-streams is aangepast zodat dit beter integreert met andere software die zorgt voor het doen van automatische kalibraties van SAMU's. Om de synchronisatie te monitoren van alle apparatuur is er een hardware packet filter ontwikkeld voor de extractie van alle tijdstempels.

De eerste metingen zijn gedaan aan een SAMU die zowel door VSL als door VTT (Finland) gemeten gaat worden.

Er is een onderzoek gedaan voor de kalibratie van digitale kWh-meters en hoe dit te implementeren. Hierover is een paper geschreven voor de CPEM2024 conferentie in Denver USA.

Een relatieve PTP-klokkalibratiemethode werd ontwikkeld op basis van een paar PTP-server-clientapparaten. Deze methode wordt gebruikt om de tijdsoverdrachtvertraging en de in- en uitgaande latentie tussen twee PTP-klokken in master-slave-hiërarchie te kalibreren. De eerste kalibratie op een paar "gouden calibrators" is voltooid. Dit kalibratiemodel werd gepresenteerd in EFTF2024.

Samenvattend: Het project ligt op schema. In 2025 eindigt dit project. Er zijn nog een aantal dingen die moeten worden afgerond, waaronder kalibratie van de PTP1588 synchronisatie van de WT5000 en de uitbreiding van de bandbreedte door vervanging van de versterkers. Deze versterkers worden in 2025 aangeschaft. Ook de instructie voor de kalibratie zal worden afgerond. En de kruiskalibratie van de PTP "gouden calibrator" met partners van RISE zal begin 2025 worden uitgevoerd.

Publicaties in 2024:

- E. Houtzager, P. van der Kamp, G. Rietveld, "*Traceable calibration of digital energy meters with IEC 61850-9-2 inputs*", full paper IEEE TIM, Moet nog verschijnen.
- E. Houtzager, P. van der Kamp, G. Rietveld, "*Calibration of digital energy meters with iec 61850-9-2 input*", abstract paper CPEM 2024.
DOI: [10.1109/CPEM61406.2024.10646123](https://doi.org/10.1109/CPEM61406.2024.10646123)
- Yan Xie, Erik Dierikx, Ernest Houtzager, "Calibration of "PTP Golden Calibrator Pair" under PTPv2 protocol in a distributed timing network". 37th European Frequency and Time Forum (EFTF), Switzerland, 2024.

Presentaties in 2024:

- Yan Xie, Erik Dierikx, Ernest Houtzager, "Calibration of "PTP Golden Calibrator Pair" under PTPv2 protocol in a distributed timing network". 37th European Frequency and Time Forum (EFTF), Zwitserland, 2024.
- G. Rietveld, E. Houtzager, P. van der Kamp, "*Traceable calibration of digital energy meters with IEC 61850-9-2 inputs*" 2024 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM), Denver, CO, USA, 2024

4.1.13 Karakterisatie van middenspanningstransformatoren tot 150 kHz (ADMIT)

Projectdoel: Het ontwikkelen van laboratoriumfaciliteiten voor het genereren en meten van wisselstromen in het frequentiebereik tot 150 kHz.

Looptijd: Juni 2023 – mei 2026

Door het toenemende gebruik van vermogenselektronica groeit het belang van metingen van de netvoedingskwaliteit tot 150 kHz. Omdat deze elektronica harmonischen en verstoringen introduceert die zich uitstrekken tot hogere frequentiebereiken, wordt het nauwkeurig beoordelen van de stroomkwaliteit binnen dit bredere spectrum essentieel. Om de potentiële effecten van deze harmonischen op de efficiëntie van apparatuur, systeemstabiliteit en elektromagnetische interferentie te evalueren, zijn herleidbare metingen nodig van instrumenttransformatoren tot 150 kHz.

Het ADMIT project heeft tot doel verifieerbare meettechnieken en protocollen te creëren voor de evaluatie van instrumenttransformatoren (IT's) die worden gebruikt bij het meten van storingen tot 150 kHz binnen middenspanningsnetten. Er wordt nauw samengewerkt met CLC / IEC TC 38, waardoor de integratie van de projectresultaten in herziene of nieuw geformuleerde normen wordt gewaarborgd. Verder zijn de uitkomsten van het project relevant voor de metrologiesector, fabrikanten van middenspanningssystemen en de academische wereld.

VSL gaat faciliteiten ontwikkelen voor het opwekken en meten van wisselstromen in het frequentiebereik tot 150 kHz. Dit omvat allereerst de ontwikkeling van een opstelling voor het genereren van wisselstroom tot 2 kA bij 50 Hz en minimaal 20 A binnen het bereik van 9 kHz tot 150 kHz. Daarnaast zal een referentiemeetsysteem worden ontwikkeld voor de kalibratie van AC-stroomtransformatoren in het frequentiebereik tussen 9 kHz en 150 kHz.

Technische voortgang in 2024:

Er is een opstelling ontworpen en gebouwd die stroom kan genereren en meten tot 150 kHz bij 14 A en 100 kHz bij 20 A. Daarnaast is een meetopstelling ontwikkeld om CT's te vergelijken met een referentie CT die tot 150 kHz is getest als transferstandaard. Deze opstelling maakt gebruik van een Precision Power Analyzer als breedbandige comparator. De eerste tests zijn uitgevoerd voor frequenties tot 5 kHz, waarbij een aantal problemen naar voren kwamen bij frequenties rond 50 Hz; deze metingen zijn in juli gepresenteerd op de CPEM conferentie in Colorado. Nieuwe metingen in de range tot 150 kHz zijn uitgevoerd waarbij de manier van aarding nader is onderzocht. Dit onderzoek wordt volgens planning volgend jaar voortgezet.

Er is bijgedragen aan een overzichtsartikel over bestaande literatuur en standaarden over instrumenttransformatoren tot 150 kHz.

Publicaties in 2024:

- Mohamed Agazar, Giovanni D'Avanzo, Guglielmo Frigo, Domenico Giordano, Claudio Iodice, Palma Sara Letizia, Mario Luiso, Andrea Mariscotti, Alessandro Mingotti, Fabio Munoz, Daniele Palladini, Gert Rietveld, Helko van den Brom, "Power Grids and Instrument Transformers up to 150 kHz: a Review of Literature and Standards", Sensors Vol. 24, no. 13: 4148, 2024, DOI: [10.3390/s24134148](https://doi.org/10.3390/s24134148)
- Fabio Munoz, Saliha Madhar, Helko van den Brom, Ernest Houtzager, and Gert Rietveld, "Calibration of Wideband Current Transformers using a Precision Power Analyzer as Comparator", CPEM Conf. Dig., Denver, Colorado, 2024. DOI: [10.1109/CPEM61406.2024.10646121](https://doi.org/10.1109/CPEM61406.2024.10646121)

Presentaties in 2024:

- Fabio Muñoz, Saliha Madhar, Helko van den Brom, and Gert Rietveld*, "Calibration of Wideband Current Transformers using a Precision Power Analyzer as Comparator," mondelinge presentatie op de 2024 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM), juli 2024, Denver, USA.

4.1.14 Metrologie voor energie-efficiëntie in DC transportsystemen (e-TRENY)

Projectdoel: Het ontwikkelen van een herleidbare meetopstelling voor on-site meting van de energie-efficiëntie van vermogensconversie-elementen in de onderstations van DC-transportsystemen.

Looptijd: Juni 2023 – mei 2026

Nieuwe voedingsarchitecturen zijn tegenwoordig beschikbaar om de elektrische energie bij remmen volledig terug te winnen in DC-transportsystemen (spoorweg, metro, lightrail, trolleybus). Om de acceptatie ervan te bevorderen, en in reactie op de behoeften van CLC TC9X en CLC TC14, zal dit project nieuwe meetmethoden ontwikkelen en toepassen voor de bepaling van de efficiëntie van de vermogensconversie-elementen (stroomomvormers, vermogenstransformatoren, opslagsystemen) en netvervuiling aan zowel AC- als DC-zijde van de onderstations in de DC-transportsystemen. Er zal een methode voor het bepalen van energiebesparing worden ontwikkeld die veldmetingen en modellen combineert. Het project zal bijdragen tot strategieën voor het beheersen van energie-efficiëntie, kosten-batenanalyses en instrumenten die vereist zijn voor compliance testen.

Binnen dit project richt VSL zich, in nauwe samenwerking met Universiteit Twente, op metingen van de energie-efficiëntie van vermogensconversie-elementen in de onderstations van DC-transportsystemen. Hiermee wordt de positie van VSL als partner voor on-site kalibratiediensten op het gebied van energieverliezen en energie-efficiëntie voor transformatoren en omzetters van grote vermogens verder versterkt.

Technische voortgang in 2024:

Er is een oriënterend werkbezoek geweest naar Hannover waar verschillende stroomsensoren worden getest op verschillende installatie plekken. Ook is er historische data van het onderstation gedeeld door de stakeholder waar een analyse op is uitgevoerd. In de tweede helft van het project zal er een tweede bezoek worden gedaan om ook “on-site” metingen aan de installatie te gaan verrichten. Daarnaast zijn aanvullende eisen aan VT's, CT's en power analyzers besproken voor de “on-site” meetcampagne. Uiteindelijk is er op basis van die specificaties hardware aangeschaft voor het online meten van harmonischen op stroom- en spanningssignalen in onderstations.

NIM China (collaborator van het EPM-project) heeft FOCS (Fibre Optical Current Sensors) geleverd voor de on-site meetcampagne die zijn binnen gekomen en onderzocht. Daarnaast is het meetplan opgesteld en ingepland.

Ter voorbereiding is de meetsoftware ontwikkeld en getest in combinatie met de Power analyzer LG671.

Publicaties in 2024:

- Domenico Giordano, Jorge Quintana Fernandez, Daniele Gallo, Jari Hällström, Daniela Istrate, Marius Jordache, Andrea Mariscotti, Gert Rietveld, Jorge Rovira, Prasanth Venugopal, Wei Zhao, “Metrology support for enhanced energy efficiency in DC transportation systems,” conferentie proceedings van de 2024 Conference Precision Electromagnetic Measurements (CPEM), Denver, USA (2024).
DOI: [10.1109/CPEM61406.2024.10646053](https://doi.org/10.1109/CPEM61406.2024.10646053)

4.1.15 Metrologie elektrische laadstations (MET4EVCS)

Projectdoel: Het realiseren van herleidbaarheid voor de nationale metrologische infrastructuur voor het testen en keuren van laadstations voor elektrische voertuigen.

Looptijd: Juli 2024 – juni 2027 (met aanvullend 60 dagen als coördinator voor de eindrapportage)

Als gevolg van de transitie naar duurzaam transport worden veel voertuigen met verbrandingsmotoren vervangen door elektrische voertuigen. Daarvoor is een toenemend aantal laadstations nodig. Daarbij zien we drie metrologische uitdagingen:

- Fabrikanten van laadstations hebben behoefte aan nauwkeurige, herleidbare meetmethoden en apparatuur voor de bepaling van de efficiëntie van een laadstation. De complexiteit zit vooral in de grillige signaaltypes die het station zelf genereert. Dit vergt breedbandige meetsystemen bij een hoog nominaal vermogen. Deze combinatie bestaat nog niet.
- De vermogenselektronica in de laadstations veroorzaakt grote verstoringen (harmonisch en supraharmonisch) in het elektriciteitsnet. Dit geeft zorgen bij de netbeheerders, omdat deze verstoringen kunnen leiden tot netuitval. De mate van verstoring is momenteel nog onvoldoende bekend en ook de gecombineerde effecten van meerdere stations dicht bij elkaar zijn niet bekend. Dit moet onderzocht worden, en op basis hiervan moet regelgeving opgesteld worden waaraan nieuwe laadstations moeten voldoen.
- Er bestaat nog geen uniform Europese regelgeving voor de energiemeters in laadstations voor elektrische voertuigen op basis waarvan de gebruiker afrekent voor de geleverde energie. De regelgeving in de huidige Measurement Instruments Directive (MID) is niet toereikend voor deze toepassing. Er is behoefte aan aanvullende metrologische informatie om de regelgeving voor de typekeuring en periodieke herkeuring van deze meters volledig te maken.

Binnen dit project richt VSL zich op:

- Coördinatie van dit project.
- De bepaling van de lokale netimpedantie bij laadstations die een belangrijke factor is in het niveau van de verstoringen die door het laadstation worden veroorzaakt.
- De realisatie van meetstandaarden, meetsystemen en meetmethoden voor het herleidbaar maken van test- en keuringsapparatuur voor laadstations voor elektrische voertuigen.

VSL draagt hiermee bij aan het in kaart brengen van netverstoringen die veroorzaakt worden door laadstations voor elektrische voertuigen en op basis hiervan wordt (samen met de resultaten van metingen van andere partners) een advies geformuleerd voor regelgeving met betrekking tot maximaal toelaatbare netverstoring door laadstations.

Tevens versterkt VSL de betrouwbaarheid van testen en keuringen van laadpalen voor elektrische voertuigen door ervoor te zorgen dat de benodigde apparatuur voor de testen en keuring herleidbaar gekalibreerd kan worden.

Technische voortgang in 2024:

Als coördinator heeft VSL in juli 2024 de kickoff meeting van het MET4EVCS project bij VSL voorbereid en georganiseerd. Daarnaast is een Data Management Plan gemaakt en besproken met het consortium. In samenspraak met RISE (Impact WP leider) is een nieuwsbrief, een project flyer, en een Dissemination, Communication and Exploitation Plan opgesteld. Samen met RISE is in november een online stakeholder workshop (met meer dan 70 deelnemers) georganiseerd om feedback te krijgen op de projectplannen en de eerste resultaten te laten zien. Ook is door VSL een projectwebsite gerealiseerd (<https://www.vsl.nl/en/met4evcs/>).

Samen met Universiteit Twente en ElaadNL is door middel van een aantal online besprekingen en een bezoek aan het Elaad laboratorium in Arnhem een plan opgesteld hoe we als Nederlandse instellingen gaan samenwerken. Een eerste idee over een opstelling voor netimpedantie is besproken, net als een breedbandig vermogensmeetsysteem. Voor dit laatste is besloten om niet de VMS (veldmeetset) die eerder in de MeterEMI en DC Grids projecten is ontwikkeld en aangepast, maar om een breedbandige power analyser (WT5000) te gebruiken met andere stroomtransducers. Daarnaast is besproken om een “breakout box” te maken om toegang te krijgen tot de stroom en spanningskanalen tussen de EVCS en de EV, zonder de communicatie te onderbreken.

Publicaties in 2024:

- A. Delle Femine, C. Iodice, J. Kučera, E. Dierikx., A. Mariscotti, I.H. Torres, J.D. de Aguilar, T. Van Wijk “Metrology for Electric Vehicle Charging Systems: an Overview of the European Research Project”, 2024 IEEE International Workshop on Metrology for Automotive, (MetroAutomotive), pp. 118 - 123

Presentaties in 2024:

- Helko van den Brom, “Metrology for Electric Vehicle Charging Stations”, Met4EVCS Stakeholder Workshop, online, 5 november 2024

4.1.16 Metrologie voor supercapaciteiten (MetroSuperCap)

Projectdoel: Het ontwikkelen van nauwkeurige en herleidbare meetmethoden voor het karakteriseren van supercapaciteiten.

Looptijd: Juni 2024 – mei 2027

De ontwikkeling van supercapaciteiten gaat momenteel razendsnel; capaciteitswaarden boven de 1000 F zijn reeds beschikbaar. Door hun specifieke werkingsprincipe vullen ze het gat op tussen een elektrolytische condensator en een oplaadbare batterij. In de praktijk zijn ze een complementair alternatief voor batterijen voor toepassingen waar een hoge vermogensdichtheid en een beperkte energiedichtheid nodig zijn, dus waar snel en kortstondig veel energie nodig is of opgeslagen moet worden. Herleidbaarheid voor supercapaciteiten bestaat momenteel niet. Dit project beoogt een nauwkeurige karakterisering van supercapaciteiten en supercapaciteitsbanken, zowel in het laboratorium als in realistische omstandigheden. Daarnaast worden gevalideerde elektrische modellen van supercapaciteiten ontwikkeld voor dynamische toepassingen. Verder is het project gericht op het ontwikkelen van snelle herleidbare meettechnieken om de state of charge en de state of health van supercapaciteiten te evalueren om toepassing van supercapaciteiten in industriële en energietoepassingen te bevorderen.

VSL is werkpakketleider in dit project en zal zich voornamelijk richten op de ontwikkeling van een referentieopstelling voor het kalibreren van supercapaciteiten. Daarnaast wordt een bijdrage geleverd aan de validatie van de nauwkeurigheid van equivalente modellen van supercapaciteiten.

Technische voortgang in 2024:

De kick-off meeting van het project in juli bij INRIM in Turijn is bijgewoond.

De fundamentele kennis over de werkingsprincipes van supercapaciteiten en bijbehorende meetmethoden is vergaard middels een uitgebreide literatuurstudie. De resultaten zijn gepresenteerd op een door VSL en CN Rood georganiseerde dag over batterijen bij VSL, met 75 aanmeldingen.

Op basis van de literatuurstudie zijn twee prototype meetsystemen opgebouwd: een gebaseerd op galvanostatisch laden en ontladen (constante stroom), en een gebaseerd op cyclische voltammetrie (constante spanningsramp). Eerste testmetingen zijn uitgevoerd aan een 0,1 F en een 10 F capaciteit, met als voornaamste doel om gevoel te krijgen voor metingen aan supercapaciteiten.

Voor de analyse van de metingen zijn verschillende equivalent circuit modellen bekeken. Een echte analyse met curve fitting moet nog verder worden ontwikkeld.

Publicaties in 2024:

- M. Zucca, N. Al-Zubaidi-R-Smith, L. Bartova, H. van den Brom, L. Callegaro, A. Cultrera, L. Fast, B. Grandinetti, M. Hassanzadeh, A. Mariscotti, A. Masouras, S. Musumeci, G. Nicol, M. Ouameur, G. Rietveld, “The project ‘Metrology for Static and Dynamic Characterization of Supercapacitors’ – MetSuperCap”, CPEM Conf. Dig., Denver, Colorado, 2024, DOI
- Mauro Zucca, Nawfal Al-Zubaidi-R-Smith, Lucie Bartova, Helko van den Brom, Luca Callegaro, Alessandro Cultrera, Lars Fast, Aldo Girimonte, Melika Hassanzadeh, Andrea Mariscotti, Athanasios Masouras, Juan Medved, Salvatore Musumeci, Giovanna Nicol, Mohamed Ouameur, Gert Rietveld, “MetSuperCap: Metrology for static and dynamic characterisation of supercapacitors”, *Measurement: Sensors*, 2024, 101434, ISSN 2665-9174, <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101434>

Presentaties in 2024:

- Helko van den Brom, Wei Zhao, en Gert Rietveld, “Metrology for characterisation of supercapacitors”, Sustainable Battery Power Symposium: From Measurement to Second-Life Solutions, 3 december 2024, Delft

4.1.17 Betrouwbaarheid van elektrische energie en elektrische energielevering (ENSURE)

Projectdoel: Het ontwikkelen van herleidbare meetinstrumenten voor het bepalen van verliezen in hoogspanningstransformatoren als gevolg van harmonischen in het elektriciteitsnet.

Looptijd: Juni 2024 – mei 2027

De verslechterde power quality en de verminderende inertie van het net door duurzame energieopwekking met bijvoorbeeld windmolens en zonnepanelen stelt nieuwe eisen en dus nieuwe meetoplossingen aan het monitoren en reguleren van energiestromen in het hoogspanningsnet.

Het project als geheel zal nieuwe hoogspanningsmeettechnologie ontwikkelen op vier gebieden: breedbandige stroom- of spanningssensoren voor het bewaken en kalibreren van onderstationinstrumentatie die kunnen worden aangesloten zonder het net spanningsloos te maken; verliesbepaling in vermogenstransformatoren veroorzaakt door harmonischen in het net; verliesbepaling van AC hoogspanningskabels; nieuwe technieken voor gedeeltelijke ontlading (PD) voor foutdetectie en lokalisatie in DC hoogspanningskabels.

VSL richt zich als werkpakketleider in dit project geheel op het tweede genoemde aspect, namelijk verliesbepaling van vermogenstransformatoren veroorzaakt door harmonischen in het net. Als onderdeel van dit project breidt VSL het toepassingsgebied van de bestaande on-site loadloss opstelling uit van 50 Hz naar hogere frequenties. Daarmee versterkt VSL haar leidende positie op het gebied van on-site load loss metingen.

Technische voortgang in 2024:

Er is een breedbandig spanningscircuit ontwikkeld voor het genereren van spanningen tot 500 V en 2 kHz. De breedbandige response van de High Voltage Capacitive Bridge (HVCB) is bepaald waarmee vervolgens de frequentieresponse van de hoogspanningsdeler (type MIL2500) is gemeten. De faseverschuiving is $<1 \times 10^{-4}$ tot 500Hz en $<1 \times 10^{-3}$ van 17 tot 2000 Hz in alle ranges van de MIL2500.

Een andere laagspanningstrafo is gebruikt voor ratiometingen van twee referentilaagspannings condensatoren tot 2 kHz en de faseverschuiving tussen 60 Hz tot 2 kHz veranderde op ppm niveau.

4.1.18 Metrologie voor hogedruk-gas- en vloeibare-waterstofflows (MethHyInfra)

Projectdoel: Onderzoek naar de meetonzekerheid van flowmeters gekalibreerd met water als deze worden toegepast bij het meten van vloeibare waterstof.

Looptijd: Juni 2021 – mei 2024

In de Europese “Green Deal” wordt een routekaart uitgestippeld voor de vergroening van energiestromen en een klimaatneutrale EU. CO₂-neutrale oplossingen voor transport en energie vormen een kernelement van de Green Deal, waarvoor investeringen in milieuvriendelijke groene of blauwe waterstof benodigd zijn. Waterstof biedt het perspectief om op groene wijze verkregen elektrische energie op te slaan in het aardgasnet. De markt voor waterstof groeit, voor zowel de gasfase als de vloeibare fase. De noodzaak van een metrologische infrastructuur voor fiscale bemetering van waterstofoverslag wordt daardoor dwingend. In dit project wordt de toepasbaarheid van verschillende flowmetertypes voor de SI-herleidbare bemetering van waterstof onderzocht, voor zowel de gasfase als de vloeibare fase. De nadruk ligt daarbij op het onderzoeken van de toepasbaarheid van sonic nozzles voor het bewerkstelligen van herleidbare flowmeting. De hoofddoelen voor het gehele consortium in dit EMPIR-project zijn:

- Ontwikkelen standaarden voor hoge-druk (tot 1000 bar en een aantal kg/min) waterstof gasflowkalibraties en ontwikkelen van geschikte sonic nozzles voor dit druk- en flowbereik.
- Kalibreren van sonic nozzles voor toepassing in waterstof gasflowstromingen.
- Numeriek simuleren van reële gasfloweffecten bij sonic nozzles.
- Onderzoek naar geschikte transfer standaarden en kalibratiemethoden in gas en vloeibare waterstofflows.
- Het dissemineren van projectresultaten (standaarden, industrieën, eindgebruikers).

VSL leidt het werkpakket dat de volgende twee doelstellingen heeft:

1. Tot stand brengen van herleidbaarheid voor metingen aan vloeibare waterstofstromen,
2. Ontwikkelen van primaire standaarden ter kalibratie van sonic nozzles die vervolgens in de herleidbaarheid voorzien voor metingen aan gasvormige waterstof door flowmeters.

Daartoe werkt VSL in dit werkpakket samen met een tiental in Europa gesitueerde zuster-onderzoeksinstituten en industriële partijen.

Het technisch werk van VSL in dit project is gericht op het realiseren van gekwantificeerde SI-herleidbare meetonzekerheid voor met water gekalibreerde flowmeters in de toepassing van LH2-flowmeting (vloeibare waterstof) voor debieten in het bereik van 1000 kg/h tot en met 5000 kg/h. Een meetonzekerheid van 0,3 % – 0,8 % in hoeveelheidsmeting wordt mogelijk geacht.

Technische voortgang in 2024:

De door VSL geleide journal publicatie aangaande de meetonzekerheid van flowmeters als deze worden toegepast bij het meten van vloeibare waterstof en gekalibreerd zijn met water en/of LNG is ingediend. Daarnaast is er bijgedragen aan een tweetal journal publicaties die geleid werden door projectpartners. De ingezette transferstandaard is geherkalibreerd op LNG en deze kalibratie is gebruikt ter ondersteuning van (de gehanteerde meetonzekerheid van) het ingezette flowmetermodel voor vloeibare waterstof condities.

De deliverable D8 is in mei 2024 ingediend bij de projectcoördinator en staat op de projectwebsite. In deze deliverable wordt al het werk dat verricht is, dus inclusief dat van de projectpartners, in het MetHyInfra-project ter verzorging van herleidbaarheid voor vloeibare-waterstofflows samengevat. De resultaten zijn in een afsluitende workshop naar stakeholders gecommuniceerd.

Publicaties in 2024:

- Böckler et al., 2024, *Metrology infrastructure for high-pressure gas and liquified hydrogen flows. A brief outline of the MetHyInfra project, measurement challenges, and first results*, Measurement, Volume 232, 15 June 2024, 114675, [Metrology infrastructure for high-pressure gas and liquified hydrogen flows. A brief outline of the MetHyInfra project, measurement challenges, and first results - ScienceDirect](#)
- Gugole et al., 2024, *Assessment of alternative fluid calibration to estimate traceable liquefied hydrogen measurement uncertainty*, International Journal of Hydrogen Energy 77, 1056 – 1065, , [Assessment of alternative fluid calibration to estimate traceable liquefied hydrogen flow measurement uncertainty](#)
- Kutin et al., 2024, *Measurement corrections for temperature effects in Coriolis mass flow meters for cryogenic, liquid hydrogen (LH2) applications*, Measurement, 237, 115155, [Measurement corrections for temperature effects in Coriolis mass flow meters for cryogenic, liquid hydrogen \(LH2\) applications](#)

Presentaties in 2024:

- Schakel et al., 2024: MetHyInfra LH2 flow traceability development achievements, MetHyInfra M36 stakeholder workshop
- Gugole et al., Uncertainty in U-tube Coriolis mass flow meters fir liquid hydrogen measurements, MetHyInfra M36 stakeholder workshop

4.1.19 Metrologie voor waterstof (Met4H2)

Projectdoel: Verder ontwikkelen en integreren van de metrologie die nodig is om de volledige toeleveringsketen van waterstof te ondersteunen, van productie tot opslag en eindgebruik.

Looptijd: Oktober 2022 – september 2025 (met aanvullend 60 dagen als coördinator voor de eindrapportage)

In de EU-waterstofstrategie voor 2020 (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0301>) zijn de plannen van de Europese Commissie uiteengezet om over te stappen op 'groene' waterstof, een koolstofvrij alternatief voor aardgas, met als doel het marktaandeel van waterstof te vergroten van 2 % in 2020 tot 14 % in 2050. Om het gebruik van waterstof uit te breiden en om te voldoen aan de specificaties voor gezondheid, veiligheid en milieu, is een metrologische infrastructuur nodig die alle delen van de toeleveringsketen aanspreekt, van fabrikant tot consument. Deze infrastructuur omvat het ontwikkelen van herleidbare metingen voor lektesten, odorisatie, zuiverheidsbeoordeling, materiaalcompatibiliteit en sensorkalibratie. Herleidbare waterstofstroommetingen en kwaliteitsbeoordelingen zijn ook nodig om eerlijke handel en overdracht van bewaring mogelijk te maken, en er is een vereiste voor lagedrukbemonsteringsmethoden voor gasnetwerken, waardoor bestaande infrastructuur kan worden gebruikt voor waterstoftransport.

Dit project zal methoden ontwikkelen ter ondersteuning van betrouwbare, herleidbare kalibratie en metingen, evenals nieuwe methoden voor het evalueren van de algehele meetonzekerheid voor de gehele toeleveringsketen van waterstof. Het zal kalibratiestandaarden ontwikkelen voor stroommeetapparatuur onder werkelijke omstandigheden, evenals standaarden voor online monitoringinstrumenten, om nauwkeurigheid en traceerbaarheid in alle stadia te waarborgen. Het zal ook meetstandaarden produceren om de waterstofkwaliteit te beoordelen, waarbij de standaarden voor veelvoorkomende onzuiverheden gelijk worden gesteld. Door gebruik te maken van de technologie en meetinfrastructuur die door dit project zijn ontwikkeld, kunnen gasnetwerken betrouwbaar worden beheerd, kunnen de prestaties worden geëvalueerd en kunnen sensoren worden gekalibreerd voor procescontrole en -bewaking, wat een veilige en efficiënte overgang naar groene waterstof mogelijk maakt.

VSL coördineert het project, waaraan meer dan 20 partners van zustermeetinstituten, de industrie en onderzoeksgroepen deelnemen. VSL ontwikkelt standaarden voor flowmeting voor waterstofverrijkt aardgas en voor waterstof voor kleine eindgebruikers (kleine industrie, huishoudens). Verder zullen standaarden en methoden voor het meten van de hoeveelheid fractie van geselecteerde belangrijke onzuiverheden, namelijk zwavel, chloor en water in waterstof, worden ontwikkeld, evenals voor het meten van geschikte geurstoffen. Ook zal een nieuw raamwerk voor fiscale meting van met waterstof verrijkt aardgas en waterstof worden ontwikkeld.

Specifiek zijn de VSL doelstellingen:

- Het ontwikkelen van standaarden en methoden voor odoranten in waterstof en met waterstof verrijkt aardgas ten behoeve van onderzoek in de industrie om te bepalen welke odoranten in gasnetwerken kunnen worden toegepast.
- Het bepalen van de CMC (calibration and measurement capability) van de GOPP (Gas Oil Piston Prover) voor gebruik met waterstof verrijkt aardgas aan de hand van een vergelijking.
- Het ontwikkelen van een flowstandaard voor debieten typisch voor huishoudmeters voor waterstof.
- Aanpassen van de bestaande hoge-druk waterdauwpuntsgenerator voor gebruik met waterstof en een koppeling aan de herleidbaarheid gerealiseerd via de molfractie van water.
- Verbeteren van analysemethoden en -technieken voor kritische onzuiverheden in waterstof, waaronder zuurstof, waterstofsulfide, water, koolstofmonoxide, koolstofdioxide, waterstofchloride.
- Haalbaarheidsonderzoek naar de analyse van chloor in waterstof.
- Het verbeteren van de modellen voor comptabele metingen van totale hoeveelheid, energie en onzuiverheidsgehalte van waterstof en met waterstof verrijkt aardgas.

Technische voortgang in 2024:

Het stabiliteitsonderzoek aan de zwavelhoudende odoranten verloopt volgens plan en er wordt geen instabiliteit gevonden. De resultaten van het stabiliteitsonderzoek aan een zwavelvrije odorant (2-hexyn) vertoont wel instabiliteit. Het vergelijk van flowstandaarden voor waterstof/aardgas loopt volgens plan. De ontwikkeling van de opstelling voor debietmetingen voor huishoudmeters is vertraagd; daarnaast is er een probleem met de beschikbaarheid van huishoudgasmeters voor het testen (taak van een partner). De analyse van zwavelverbindingen in waterstof loopt volgens plan. Het ziet ernaar uit dat de beoogde gevoeligheid van de methode gehaald zal worden. Voor de werkzaamheden in werkpakket 4, de validatie van de modellering van de totalisatie is er doorgewerkt aan de tijdreeksanalyse van de data. Verder is begonnen aan een overzichtsartikel, een best practice guide en het technisch rapport.

Publicaties in 2024:

- Van der Veen A.M.H., Folgerø K., Gugole F., "Measurement uncertainty in the totalisation of quantity and gas quality measurement in gas grids", MathMet 2022, submitted to *Gases*

Presentaties in 2024:

- Van der Veen A.M.H., "Measurement uncertainty in fiscal metering of energy gases", H2GAR & Met4H2 Meeting, 18 January 2024
- Beelen R., Van der Veen A.M.H., Baldan A., De Boed J., De Jong C., "Matrix influence on the analysis of sulfur-containing compounds in hydrogen enriched natural gas and hydrogen with GC-SCD", GAS Analysis 2024, Paris, France, January 2024
- Van der Veen A.M.H., "A measurement infrastructure for hydrogen and blends of hydrogen in natural gas", 6 March 2024, EHEC 2024, Bilbao, Spain
- Van der Veen A.M.H., "Health, safety and environmental aspects of the hydrogen supply chain", project workshop Met4H2, CAE, Würzburg, Germany, 14 March 2024
- J. Kutin, G. Bobovnik, Gugole F., Van der Veen A.M.H., "Evaluation of uncertainty associated with totalisation of time-sampled data in gas quantity and energy measurements", XXIV IMEKO World Congress "Think Metrology"

4.1.20 Herleidbare metrologie voor waterstof in gasnetwerken (H2FlowTrace)

Projectdoel: Het tot stand brengen van SI-herleidbaarheid voor de stroming van waterstof in het hogedruk aardgasnet vanaf primair niveau.

Looptijd: September 2024 – augustus 2027

Waterstofgas kan een volledig duurzaam alternatief vormen ter vervanging van aardgas en tegelijkertijd hernieuwbaar gewonnen energie opslaan in het aardgasnet of ondergronds. Opslag stelt de maatschappij in staat piekvraag op te vangen met duurzaam gewonnen energie. Hede ten dage ontbreekt directe herleidbaarheid voor waterstof gas flow in het aardgasnet, terwijl de vraag hiernaar in de industrie breed gedragen wordt. Om de doelstellingen van de Europese Green Deal en het klimaatakkoord te bewerkstelligen dient de herleidbaarheid voor waterstof gas flow tegen het jaar 2025 gereed te zijn. In dit project wordt de metrologische infrastructuur hiervoor ontwikkeld zodat volledig herleidbare flow kalibraties op pure waterstof en in het druk- en flowbereik die van toepassing zijn op het aardgasnet mogelijk zijn rond het jaar 2025. De hoofddoelen van het gehele project zijn:

- Opleveren robuuste metrologische infrastructuur voor waterstof en waterstof/aardgasmengsel gas flow in het bereik van 0,1 m³/h tot en met 400 m³/h en voor drukken van 0,01 MPa(g) t/m 1,6 MPa(g) en met een meetonzekerheid van 0,2 % of kleiner.
- Opleveren transferstandaard voor waterstof en waterstof/aardgasmengsel gas flow in het bereik van 200 m³/h tot en met 10 000 m³/h en voor drukken van 0,3 MPa(g) tot en met 6,2 MPa(g) en met een meetonzekerheid van 0,2 % of kleiner.
- Het gezamenlijk ontwikkelen van de transferstandaard voor de overdracht van herleidbaarheid naar aardgasnet- en opslagtoepassingen. Deze transferstandaard wordt gezamenlijk

ontwikkeld tussen metrologische instituten zodat de financiële last ervan gedragen kan worden door het project.

- Het opleveren van representatieve datasets met kalibratieresultaten van huishoudelijke en industriële gasmeters, op primair en secundair niveau, met verschillende typen kalibratiegassen, zoals lucht, waterstof, helium, methaan, en van verschillende typen gasmeters (zoals ultrasone, rotor en turbine gasmeters). Het bepalen van de transfereerbaarheid van gasmeter kalibraties met alternatieve gassen naar kalibraties met waterstofgas.
- Het uitdragen van het bestaan van een Europese metrologische infrastructuur voor waterstof gas flow kalibraties en het stimuleren van het gebruik maken hiervan door de meetketen, standaardisatiecomité's (ISO/TC 30, OIML TC 8/SC7, CEN/TC 237) en eindgebruikers (aardgas transmissie- en distributie bedrijven, FARECOGAZ, ENTSG, Hydrogen Europe en Hydrogen Europe Research).

VSL is actief in alle werkpakketten van dit project en richt zich op de volgende hoofddoelen:

- Coördineren en deelnemen in het gezamenlijk ontwikkelen van een transfer skid voor de overdracht van herleidbaarheid naar de aardgasnet toepassing.
- Oplevering van representatieve datasets voor het bepalen van de transfereerbaarheid van huishoudelijke-gasmeterkalibraties met alternatieve gassen naar kalibraties met waterstofgas.
- Oplevering kalibratieresultaten van grote industriële gasmeters met waterstof/aardgasmengsels en andere gassen als kalibratiemedium en met een kleine meetonzekerheid (0,1 %).
- Het zetten van een belangrijke stap in het realiseren van een Europese metrologische infrastructuur voor waterstof gas flow kalibraties in het industriële bereik.
- Het uitdragen van het bestaan van ongebroken, direct SI-herleidbare kalibratiemogelijkheden voor waterstof gas flow kalibraties en het stimuleren van het gebruik maken hiervan door de meetketen, standaardisatiecomité's en eindgebruikers.

Met dit project wordt een ongebroken, geheel onafhankelijke SI-herleidbaarheidsketen vanaf primair niveau opgeleverd voor de stroming van waterstof in het hogedruk aardgasnet. Dit is een belangrijke stap voor het stimuleren van het vertrouwen in de verhandeling van grote hoeveelheden waterstof en het project dient daarmee de energietransitie.

Noot: De herleidbaarheid naar een nog te ontwikkelen Franse primaire standaard die gerealiseerd zal worden in H2FlowTrace is een belangrijke stap, maar wat betreft onzekerheid en bereik nog onvoldoende om te voorzien in de behoefte van Nederlandse stakeholders. Los van het feit dat deze Franse standaard dus niet geheel kan voorzien in de Nederlandse behoefte, en van het nationale belang om zelf over een primaire herleidbaarheidsketen te beschikken op dit cruciale onderdeel van de energietransitie, is het essentieel om te komen tot meerdere onafhankelijke primaire realisaties in Europa, om vergelijk en wederzijdse erkenning mogelijk te maken.

Technische voortgang in 2024:

Het overzicht van bestaande Europese pure-waterstoffaciliteiten is grotendeels vervaardigd. Het gezamenlijk ontwikkelen van de transferstandaard (skid) verloopt volgens plan. De te acquireren mastermeters voor het skid zijn geïdentificeerd. Een literatuurstudie is gestart waarvan de resultaten zullen leiden tot identificatie van industriële gasmeters waarvoor een gebrek aan kennis bestaat aangaande de te behalen nauwkeurigheid in de waterstoftoepassing bij gebruikmaking van een kalibratie met een alternatief medium. Voor de huishoudelijke toepassing is contact gelegd en kennis gedeeld met de CEN/TC 237 *Gas meters* normcommissie.

Publicaties in 2024:

- Schakel et al., 2024 *Hydrogen gas flow traceability transfer standard for the gas grid*, Global Flow Measurement Workshop 2024.

Presentaties in 2024:

- Workamp, M., 2024 *Hydrogen gas flow traceability transfer standard for the gas grid*, Global Flow Measurement Workshop 2024.
- Schakel, M., *Hydrogen calibration of household gas meters: results from European Metrology Research projects and knowledge gaps*, CEN/TC 237 October 2024 meeting.

4.2 Milieu

4.2.1 Emissies van gevaarlijke stoffen in binnenlucht (MetrIAQ)

Projectdoel: Het ontwikkelen van goed gedefinieerde en traceerbare gasvormige gecertificeerde referentiematerialen (CRM) voor het betrouwbaar en vergelijkbaar bepalen van emissies van gevaarlijke stoffen uit bouwmaterialen in binnenlucht.

Looptijd: Juni 2021 – mei 2024

Producten zoals bouwmaterialen en meubilair stoten VOC (Vluchtige Organische Stoffen, Volatile Organic Compounds) uit, die alom vertegenwoordigd zijn in binnenlucht. Deze stoffen veroorzaken irritatie aan de zintuigen en gezondheidsklachten. Europeanen spenderen 80% of meer van hun tijd binnen, dus het is essentieel dat binnenlucht gezond is. Dit kan worden bereikt door het controleren van emissiebronnen en door het elimineren of beperken van de emissie van VOC in lucht. Er is een verplichte testprocedure voor het bepalen van emissies van gevaarlijke stoffen uit bouwmaterialen in binnenlucht. Echter, voor het verkrijgen van betrouwbare en vergelijkbare meetresultaten zijn geen goed gedefinieerde emissie-referentiematerialen (ERM) en traceerbare gasvormige gecertificeerde referentiematerialen (CRMs) beschikbaar.

VSL is werkpakketleider voor het ontwikkelen en validatie van de ERMs en CRMs. Dit wordt uitgevoerd in de vorm van het ontwikkelen van bereidings- en analysemethodes, resulterend in een Guideline, inclusief validatie van de methodes en resultaten van korte en lange termijn stabiliteitsonderzoek. VSL en BAM organiseren een ringvergelijk ter onderbouwing van het geheel.

Technische voortgang in 2024:

VSL heeft een opstelling ontwikkeld voor het maken van gasmengsels met formaldehyde in stikstof. De eerste mengsels zijn gemaakt en geanalyseerd. Voor het maken van PRM's dient de methode nog verder ontwikkeld te worden.

VSL heeft een interlaboratoriumvergelijk georganiseerd voor de validatie van de in het project ontwikkelde gasvormige referentiematerialen. De resultaten van de deelnemers zijn door VSL verwerkt en gerapporteerd.

Binnen het project zijn primaire referentiematerialen ontwikkeld voor relevante chemische verbindingen in binnenlucht, bestaande uit n-hexaan, methyl isobutyl keton, toluen, butyl acetaat, cyclohexanon, o-xyleen, fenol en 1,3,5-trimethylbenzene in lucht en stikstof. Bereiding van fenol in hoge-drukcilinders bleek niet mogelijk, dus die component is via dynamische verdunning gerealiseerd. Op basis van een stabiliteitsstudie en een interlaboratoriumvergelijk zijn de referentiematerialen gevalideerd en is de onzekerheid bepaald. De onzekerheid voor dynamische gasmengsels is 5 %, en voor de statische gasmengsels ligt dit tussen de 8 % en 16 % afhankelijk van de stabiliteit van de verbindingen in cilinders. De 5 % onzekerheid voor de dynamische gasmengsels valt binnen de doelen van het project. Daarnaast is een opstelling ontwikkeld voor het maken van referentiematerialen met formaldehyde in stikstof. Deze functioneert, maar haalt nog niet de gewenste prestaties. Dat zal verder worden opgepakt in een ontwikkelingsproject in 2025.

Presentaties in 2024:

- Metrology for the determination of emissions of dangerous substances from building materials into indoor air, EURAMET TC-MC SGGA, 6-2-2024 bij VSL in Delft.

4.2.2 Emissie van ammoniak in de veehouderij (QuantiAGREMI)

Projectdoel: Het verbeteren van de bepaling van ammoniakemissies van veehouderijbedrijven. Hierbij wordt zowel gekeken naar de bepaling van de ammoniakconcentraties in en rond de stallen als naar het volumedebiet door de open stallen.

Looptijd: November 2022 – oktober 2025

De agrarische sector binnen de EU is verantwoordelijk voor 93% van de ammoniakemissie binnen de EU en levert daarmee een grote bijdrage aan de fijnstof- en stikstofproblematiek. Onderzoek is noodzakelijk om de emissie en verspreiding van ammoniak beter te begrijpen en om de thans grote onzekerheid in de meetresultaten te reduceren. Dit project richt zich op een verbeterde bepaling van ammoniakemissies van veehouderijbedrijven. Hierbij wordt zowel gekeken naar de bepaling van de ammoniakconcentraties in en rond de stallen alsook naar het volumebiet door de open stallen.

Binnen dit project zal VSL werken aan de ontwikkeling van een tweetraps verdunningssysteem voor ammoniak dat kan worden gebruikt voor kalibratie en validatie van ammoniak meetapparatuur. Meer specifiek, VSL bouwt een opstelling op basis van 2-trapsverdunning waarbij vocht kan worden toegevoegd aan een dynamisch gasmengsel van ammoniak in lucht om beter te matchen met een praktijksample. Zeker voor NH_3 betekent de aanwezigheid van vocht een wereld van verschil voor het analyseresultaat en de meetduur (o.a. competitie in adsorptie gedrag aan de tubing).

Verder wordt er gewerkt aan het modelleren van het volumedebiet door open stallen met als doel het verkleinen van de thans zeer grote onzekerheid in de bepaling van het debiet (>30%). Het mathematisch model dat door de DSM-groep wordt ontwikkeld is een opstap naar uitbreiding van kennis en bredere inzetbaarheid.

Als spin-off wordt meegewerkt aan de inzet van een alternatief tracer gas. Qua research niet de grootste uitdaging, maar op die manier is er contact met nieuwe potentiële gebruikers van VSL diensten.

Technische voortgang in 2024:

De dynamische opstelling (TRACTOR, TRaceable Ammonia CalibraTOR) is gebouwd en vervolgens getest met een niet-plakkende component (CO) met behulp van zowel een monitor als de TDLS-opstelling. De resultaten waren goed voor verdunningen tot tienduizend keer (onzekerheid < 2 %) en de tijdrespons is erg snel (enkele seconden). Daarna zijn er testen met NH_3 uitgevoerd, zowel met als zonder vocht (maximaal 80 % RH). Aanvankelijk waren er flinke fluctuaties in de NH_3 molfractie, veroorzaakt door de zero air generator. Door toepassing van een additionele drukregelaar konden die fluctuaties worden verminderd. De tijdrespons is niet zo snel voor NH_3 , ondanks het gebruik van gecoate leidingen en gecoate mass flow controllers.

De software voor de aansturing van de mass flow controllers, drukregelaars, en data logging is gereed en gevalideerd. Tevens is een handleiding geschreven voor de software.

De TRACTOR is eind mei bij projectpartner LNE geïnstalleerd voor de comparison. De medewerkers van LNE hebben de opstelling zelfstandig gebruikt na een korte training. Twee statische NH_3 standaarden (bereid en gecertificeerd door VSL) zijn gebruikt voor de comparison. De VSL resultaten van de comparison zijn goed, zowel voor droge als vochtige condities.

Daarnaast is de TRACTOR gebruikt bij een veldmeetcampagne in Middenmeer geleid door TNO. In deze campagne werd NH_3 gemeten door diverse instrumenten van verschillende projectpartners (o.a. CEH uit de UK en TNO) en daarnaast ook RIVM. De prestaties van de verschillende meetopstellingen varieerden sterk: sommige opstellingen reageerden zeer snel en waren nauwkeurig, andere gaven geen response of hadden een bias. TNO zal over de resultaten van deze campagne een rapport schrijven.

Een externe partij heeft een kar ontworpen voor de TRACTOR. Deze opstelling wordt begin 2025 opgebouwd.

Verder zijn alternatieve tracer gassen gemaakt (combinatie CH₄ en C₂H₆ op lage fracties) en naar projectpartner EMPA gestuurd.

Er is een rapport gemaakt over de dispersiesimulaties met daarin een definitief advies over de bepaling van de optimale positie voor de sensoren. De resultaten komen overeen met wat nu gangbaar is in stallen. De resultaten zijn besproken met TNO en WUR.

4.2.3 Meting van atmosferische NO₂-concentraties met een hydrogelsensor (GELSONDE)

Projectdoel: Het ontwikkelen van een hydrogel-based sensor voor het meten van atmosferische NO₂ concentraties.

Looptijd: Juli 2024 – Juni 2028

Het nauwkeurig meten van lage NO₂ concentraties in de buitenlucht is een essentieel onderdeel van de stikstof problematiek en een belangrijk onderdeel voor het in kaart brengen van regionale gezondheidsrisico's. Huidige sensortechnieken zijn veelal niet selectief genoeg voor NO₂ en gevoelig voor drift als gevolg van verandering in druk, temperatuur en luchtvochtigheid. Het beoogde nieuwe sensor type moet een betere NO₂ meting mogelijk maken.

VSL zal een bescheiden rol spelen door in ieder geval bij de projectmeetings de plannen en de voortgang van het project te volgen om in dit veld een positie in te kunnen gaan nemen. Bij de validatie van de sensor zal VSL actief bijdragen met NO₂-testgas en/of spectroscopische meetfaciliteiten.

Technische voortgang in 2024:

De start van het project is verschoven naar november 2024. Binnen VSL is gestart met een inventarisatie van onze mogelijke bijdrage aan het project.

4.2.4 Metrologie voor groene scheepvaart (MaritimeMET)

Projectdoel: Het faciliteren van de optimalisatie en regulatie van uitstoot in de Nederlandse binnenvaartindustrie, door middel van herleidbaarheid voor dynamische temperatuur- en druksensoren in scheepvaart motoren, en metrologische validatie van kunstmatige intelligentie modellen die scheepvaartmotoren nabootsen.

Looptijd: September 2024 – augustus 2027

De transitie richting een groene scheepvaart vereist ontwikkeling in de metrologie die de toepassing van flexibele energieconversiesystemen ondersteunt. Deze flexibele energieconversiesystemen kunnen klassieke verbrandingsmotoren zijn waar systeemoptimalisatie plaatsvindt op ten behoeve van uitstootreductie op basis van druk en temperatuurmetingen in de verbrandingskamers. Hierbij zijn ook ontwikkelingen in het mengen van verschillende hernieuwbare brandstoffen waar actuele proces condities nauwkeurig in de gaten gehouden moeten worden. De ontwikkelingen in het veld van kunstmatig intelligentie (b.v. Machine Learning en modellen) dragen bij aan het optimaliseren van zowel motoren als nabehandelingssystemen. Onzekerheidskwantificering en herleidbaarheid bij modelleren is een steeds groter wordende vraag, en dus ook in de maritieme sector.

De technologieën Temperatuur, Optica en Data Science and Modelling zullen bijdragen aan de technische doelen van het project. Temperatuur zal met behulp van Optica een dynamische-temperatuurreferentiestandaard ontwikkelen. Dit apparaat, op basis van snelle InAs detectoren en fiberoptica, zal worden ontworpen om gebruikt te worden in een werkende testmotor. In de ontwikkelingsfase van de referentie standaard zal deze worden gevalideerd. Hiervoor zal de bestaande radiantiestandaard van VSL worden uitgebreid om de detectorrespons bij de benodigde thermische frequenties van de referentiestandaard herleidbaar te kunnen kalibreren. Deze opstelling is gebaseerd op gepulste lasersystemen waarmee ook de tijdsrespons van de detectoren zal worden gekalibreerd. De referentiestandaard zal ook bij projectpartners RISE en/of CMI dynamisch worden gekalibreerd met een pyrometrische opstelling waardoor deze twee afzonderlijke herleidbaarheidsketens zal hebben. De

technologie DSM zal zich richten op kwantificatie van onzekerheid en verificatie van de Machine Learning algoritmes ontwikkeld door project partners.

Met de nieuwe dynamische temperatuur referentiestandaard zullen in-engine temperatuurmetingen worden verricht in een werkende testmotor. Door herleidbaar en met een zo laag mogelijke onzekerheid de temperatuur van een werkende motor te meten, kunnen de chemisch kinetische mechanismes, waar ML algoritmes op worden getraind, beter afgestemd worden. Door een goede onzekerheidskwantificatie van de ML voorspellingen van emissies, kunnen motorfabrikanten schonere en zuinigere motoren ontwikkelen en efficiëntere nabehandelingseenheden bouwen.

VSL zal bijdragen aan een best-practice guide voor dynamische temperatuur kalibraties en metingen. Verder zal VSL een bijdrage leveren aan een technisch rapport waarin de resultaten van de onzekerheidskwantificering van de Machine Learning modellen wordt beschreven. Behalve de interne verslaggeving, zal er minstens één technische open-access publicatie worden geschreven over de resultaten van de project die door VSL behaald zijn (over o.a. de karakterisatie/kalibratie van de dynamische temperatuur standaard en de gevalideerde Machine Learning modellen).

Technische voortgang in 2024:

De kick-off meeting is op 10-11^{de} september bijgewoond. Er is een plan van aanpak gemaakt en materiaal besteld en ontvangen voor de constructie van de dynamische temperatuur referentiestandaard. Wetenschappers van Thermometrie en MDV hebben de detectorrespons gemodelleerd en randvoorwaarden bepaald voor de constructie van de dynamische temperatuur referentiestandaard.

4.3 Gezondheid

4.3.1 Metrologie voor in de tijd gemoduleerde verlichting (MetTLM)

Projectdoel: Het ontwikkelen van meetopstellingen en meetmethoden voor het kalibreren van lichtbronnen en sensoren voor Temporal Light Modulation (TLM).

Looptijd: Mei 2021 – april 2024 (met aanvullend 60 dagen als coördinator voor de eindrapportage)

In samenwerking met: Elektriciteit, Tijd en Frequentie

Moderne LED-gebaseerde verlichtingssystemen kunnen een tijdafhankelijke variatie van de lichtopbrengst laten zien, variërend van enkele Hz tot tientallen kHz. Deze ‘temporal light modulation’ (TLM), kan onder bepaalde omstandigheden negatieve effecten hebben op de gezondheid en het welbevinden van mensen en kan ook veiligheidsrisico’s met zich meebrengen. Met regelgeving, zoals de nieuwe Europese Ecodesign Regulation, die in 2021 van kracht werd, worden daarom eisen gesteld aan de maximaal toegestane lichtvariatie, uitgedrukt in diverse metrics. Het gaat hier in het bijzonder om de metric PstLM (short term perceptability for light modulation) voor flicker en SVM (Stroboscopic Visibility Metric) voor het stroboscopisch effect. Flicker is direct zichtbare intensiteitsmodulatie van de lichtbron. Het stroboscopisch effect wordt zichtbaar wanneer een bewegend voorwerp wordt belicht door een gemoduleerde lichtbron.

Hoewel er eisen gesteld worden aan de maximaal toelaatbare modulatie, zijn internationaal geaccepteerde meetstandaarden voor het meten van TLM nog niet beschikbaar. De CIE (International Commission on Illumination) heeft daarom het initiatief genomen om tot internationale standaarden te komen voor TLM. Binnen het EMPIR-programma is het project “Metrology for Temporal Light Modulation” van start gegaan om hiervoor de metrologie te ontwikkelen. Dit project wordt door VSL gecoördineerd.

Algeheel doel voor VSL is om met dit project een internationaal leidende rol te verwerven op gebied van metrologie voor TLM. VSL is hiervoor goed gepositioneerd als een van de weinige NMI's die op dit moment flickermeters kalibreert en actief betrokken is bij de CIE. Naast het door ontwikkelen van

diensten voor TLM, kan VSL als coördinator een sturende bijdrage leveren aan het opstellen van guidelines/recommendations voor de CIE en ander stakeholders.

VSL richt zich in dit researchproject op het uitbreiden van de faciliteit voor het meten van TLM, zodat hiermee herleidbare metingen van PstLM en SVM kunnen worden uitgevoerd. Met deze faciliteit zullen metingen worden gedaan aan een aantal TLM-meetinstrumenten om de relevante 'quality metrics' vast te stellen (frequentiebereik, lineariteit, belichtingsniveau e.d.).

Technische voortgang in 2024:

In 2024 is een raamwerk ontwikkeld voor het doorrekenen van onzekerheden in metingen aan tijd-gemoduleerde verlichting. Dit raamwerk is gebruikt voor het analyseren van de metingen, uitgevoerd bij VSL, in het kader van een ringvergelijking. Daarnaast zijn de metingen van de overige deelnemers van de ringvergelijking geanalyseerd en verwerkt in een eindrapport. Er is een concept publicatie opgesteld over de resultaten en conclusies van de ringvergelijking die ingediend gaat worden bij een academisch tijdschrift.

In samenwerking met AALTO is een dataset van 80 tijd-gemoduleerde lichtbronnen geanalyseerd, waarmee de rekenmodellen voor TLM zijn gevalideerd. Een gezamenlijke publicatie over de resultaten van dit onderzoek is ingediend. De afsluitende bijeenkomst van het MetTLM project is gehouden bij PTB. Gekoppeld aan deze bijeenkomst is een trainingssessie gehouden waarbij stakeholders uit de meetinstrumentenindustrie, testlaboratoria en de verlichtingsindustrie aanwezig waren. In samenwerking met LightingEurope is een webinar gehouden over het meten van temporale lichtmodulatie en *ecodesign*, waarbij de resultaten van het MetTLM zijn gepresenteerd.

Over de looptijd van het project als geheel zijn de implementaties van de door de International Electrotechnical Commission (IEC) beschreven rekenmodellen voor flicker en het stroboscopisch effect verbeterd en gevalideerd. Vervolgens zijn de modellen verwerkt in een raamwerk voor onzekerheidspropagatie. Op deze manier is een herleidbare referentiemeter ontwikkeld voor TLM-metingen. De op deze manier opgezette herleidbaarheid is gevalideerd in een ringvergelijking tussen acht projectdeelnemers en een ringvergelijking georganiseerd door de IEA SSL annex. Tevens zijn binnen het project laser- en led-gebaseerde referentiebronnen voor TLM gerealiseerd die beschikbaar zijn voor validatie van TLM-meters van derden. Het EU-project waarvan deze werkzaamheden onderdeel zijn is door VSL succesvol gecoördineerd.

Publicaties in 2024:

- V. Mantela, R. Nordlund, J. Askola, P. Kärhä, P. Dekker, and E. Ikonen, 'Improvement of temporal light artefact effects in commercial LED lamps', *Lighting Research & Technology*, vol. 56, no. 7, pp. 790–799, Nov. 2024, doi: 10.1177/14771535241287549.
- E. Ikonen, V. Mantela, P. Dekker, P. Kärhä 'Interlaboratory comparison on traceable flicker and stroboscopic effect measurements of light sources', peer reviewed abstract IEEE Sustainable Smart Lighting World Conference (LS24)
- M. Kuiper, S. Källberg, H. van Aalderen, V. Mantela, A. Thorseth, R. Zuber, F. Topalis, T. Reiniers and P. Dekker 'Interlaboratory comparison on traceable flicker and stroboscopic effect measurements of light sources', peer reviewed abstract IEEE Sustainable Smart Lighting World Conference (LS24)

Presentaties in 2024:

- Gezamenlijke webinar met LightingEurope en het MetTLM consortium over : "measurement of lighting with temporal light modulation and *ecodesign*" (<https://www.lightingeurope.org/events/715-measurement-of-lighting-with-temporal-light-modulation-and-ecodesign>), online op 12 april 2024
- Trainingssessie over meten tijd gemoduleerde verlichting, online op 18 april 2024
- Presentatie van MetTLM project bij CIE Nederland op 12 juni 2024
- Presentatie van MetTLM project bij EURAMET TC-PR op 23 januari 2024
- Presentatie van MetTLM project bij CCPR op 05 april 2024

- Presentatie "Interlaboratory comparison on traceable flicker and stroboscopic effect measurements of light sources " op "IEEE Sustainable Smart Lighting World Conference (LS24)" op 8 november 2024

4.3.2 Metrologie voor draagbare lichtloggers en optische dosimeters (MeLiDos)

Projectdoel: Het ontwikkelen van kalibratiedienst voor draagbare lichtloggers en optische dosimeters, in lijn met internationale standaarden, onder ontwikkeling bij de CIE.

Looptijd: Juni 2023 – mei 2026

Licht en verlichting hebben een enorme impact op slaap, gezondheid en welzijn van mensen. Naar de biologische en fysiologische effecten van licht op mensen wordt voortdurend klinisch onderzoek gedaan. Daarbij worden meerkanaalse draagbare lichtdosimeters gebruikt om de blootstelling van mensen aan licht te kwantificeren op basis van de response van vijf niet-beeldvormende fotoreceptoren in het oog. De vijf fotoreceptoren stimuleren vervolgens de intrinsiek lichtgevoelige ganglioncellen (ipRGC's) van het netvlies die niet-beeldvormende effecten van licht bij mensen stimuleren. Hoewel er gestandaardiseerde methoden en meetgrootheden zijn geïntroduceerd (CIE S 026:2018), is de kalibratie en karakterisatie van draagbare lichtdosimeters een uitdaging. Binnen het project "Metrology for wearable light loggers and optical radiation dosimeters" zullen hiervoor meetmethoden worden ontwikkeld en gestandaardiseerd.

VSL zal binnen het project een bron-gebaseerde methode ontwikkelen waarmee een breed scala aan dosimeters gekarakteriseerd en gekalibreerd kan worden. Naast het ontwikkelen van diensten voor kalibratie van dosimeters, kan VSL binnen het impact werkpakket een sturende bijdrage leveren aan het opstellen van richtlijnen en aanbevelingen voor de CIE en andere stakeholders.

Technische voortgang in 2024:

Lichtloggers zijn geselecteerd, op basis van selectiecriteria, en aangeschaft door projectpartners. Op basis van de input van projectpartners heeft VSL een rapport geschreven over de parameters, technische uitdagingen en potentiële methode voor de karakterisatie van draagbare lichtloggers. Drie lichtloggers zijn inmiddels gekarakteriseerd voor relatieve spectrale responsiviteit op de opstelling voor spectrale responsiviteit van detectoren. Voor de analyse van de resultaten is een algoritme ontwikkeld dat de tijd opgeloste data van de lichtloggers koppelt aan de referentiemetingen. De effecten van uitlijning en temperatuur van de lichtlogger zijn in kaart gebracht. Daarnaast is een spectraal verstelbare bron geselecteerd en aangeschaft, welke zal worden ingezet voor verdere spectrale karakterisatie van de lichtloggers. De levering hiervan volgt in de komende periode.

Presentaties in 2024:

- Posterpresentatie over de spectrale karakterisatie van de lichtlogger is gegeven op The Hague University of Applied Sciences (THUAS)
- Presentatie van MetTLM project bij CIE Nederland op 12 juni 2024

4.3.3 Dosimetrie voor Röntgendiagnostiek (TraMeXI)

Projectdoel: Een bijdrage leveren aan de herleidbaarheid voor radiologische Röntgenkwaliteiten en daarmee de interne kennis, het externe netwerk en de zichtbaarheid van VSL op dit gebied te vergroten.

Looptijd: Juni 2023 – mei 2026

Jaarlijks wordt voor gemiddeld voor iedere Europeaan meer dan één diagnostische of interventionele röntgenbeeldvormingsonderzoek uitgevoerd (totaal ca. 660 miljoen). De blootstelling aan ioniserende straling bij röntgendiagnostiek geeft kans op late nadelige gezondheidseffecten en hangt af van de correcte, herleidbare kalibratie van dosimetrie-apparatuur. Het medische gebruik van straling is doorgaans goed gerechtvaardigd, maar vanwege de potentiële (late) schade dient de stralingsdoses, gemeten met dosimeters, te worden geëvalueerd, geoptimaliseerd en gekalibreerd. Standaardisatie van dosimetrie-procedures blijft achter bij de technologische ontwikkeling op het gebied van medische

röntgendiagnostiek. De huidige normen voor kalibratieprocedures zijn verouderd en houden hier geen rekening mee: de stralingskwaliteiten dekken niet het klinische bereik en er bestaat geen herleidbaarheid naar internationaal geaccepteerde primaire standaarden voor de nieuwste generatie detectoren.

De IAEA, als chieft stakeholder van dit project, is in 2021 een nieuw onderzoeksproject gestart om de behoeften aan de update van haar norm (TRS-457) te evalueren. Daarnaast zijn er strikte eisen gesteld aan detectoren voor toepassing in kwaliteitscontrole voor de radiodiagnostiek. Ook de IEC 61674-norm heeft prestatiekenmerken gedefinieerd detectoren voor röntgendiagnostiek. Specifieke eisen voor dosimeters voor het leveren van herleidbare metingen in ziekenhuizen ontbreken daarin echter. Een nieuwe generatie van halfgeleiderdetectoren zoals x-ray multimeters (XMM's) biedt een breed scala aan nieuwe toepassingen en mogelijkheden. Dit type apparatuur levert naast de gemeten stralingsdosis in termen van luchtkerma, andere grootheden en parameters zoals röntgenbuis spanning, halveringsdikte, totale filtratie, buis spanning en bestralingstijd etc. Momenteel, echter bestaan er geen internationale richtlijnen m.b.t. prestatie-eisen, onzekerheden of kalibratierichtlijnen voor deze apparatuur. De definitie van referentieklaas dosimeters voor röntgendiagnostiek is essentieel voor het categoriseren van verschillende kwaliteitsklassen van dosimeters. Dit zal dosimetrielaboratoria ondersteunen bij hun selectie van geschikte meetmethoden om zo hun procedures te verbeteren herleidbare metingen te garanderen. Dit onderzoek zal bijdragen aan het verbeteren van de kalibratieprocedure van XMM-apparatuur en zal de betreffende fabrikanten helpen om hun producten te optimaliseren en beter op de internationale markt te positioneren. Dit leidt naast kostenefficiënte tot verbeterde kwaliteitsborging van röntgendiagnostiek, lagere stralingsbelasting aan de (Europese) bevolking en minder kans op late nadelige gevolgen van diagnostische handelingen voor patiënten.

Binnen dit project richt VSL zich op het leveren van een bijdrage aan de herleidbaarheid voor radiologische röntgenkwaliteiten en daarmee vergroten van interne kennis, het externe netwerk met als doel een uitbreiding van de VSL scope op het gebied van radiologische stralingskwaliteiten, betere aansluiting bij de (inter-)nationale radiodiagnostiek en een betere (meer volledige) dienstverlening. Ook het uitvoeren van consultancy opdrachten voor klanten komt hiermee meer binnen bereik.

Technische voortgang in 2024:

Het project loopt volgens plan. Er zijn nieuwe stralingskwaliteiten gedefinieerd op basis van uitgezette enquêtes. Voor WP4, waarvan VSL WP-leider is, is de comparison is gestart. VSL heeft als eerste zijn metingen gedaan en nu is het derde lab bijna klaar. Het project loopt daarmee zelfs iets voor op de oorspronkelijke planning.

4.4 Geavanceerde elektronica

4.4.1 Metrologie voor watersporen in ultrapure gassen (PROMETH2O)

Projectdoel: Het ontwikkelen van een methode voor het genereren van lage molfracties water (50 nmol/mol – 5 µmol/mol) in diverse matrixgassen met behulp van een magnetische suspensiebalans. Tevens de bepaling van de enhancementfactor voor water in argon en stikstof bij drukken tussen 0.1 en 1 MPa en vriespunttemperaturen van -80 °C tot -30 °C.

Looptijd: Juni 2021 – mei 2024

Binnen diverse takken van de industrie, zoals de gas- en halfgeleiderindustrie, is het belangrijk dat in bepaalde processen weinig vocht aanwezig is (lage ratio µmol/mol of zelfs nmol/mol) om de kwaliteit van het eindproduct te kunnen garanderen. Ook binnen VSL wordt de rol van vocht steeds belangrijker vanwege de toenemende vraag naar gasmengsels voor reactieve componenten (o.a. NO₂ en HCl), waarvan de stabiliteit negatief beïnvloed wordt door de aanwezigheid van vocht. Een nauwkeurige en snelle meting van vocht tijdens het maakproces en in de geproduceerde gasmengsels is van groot belang om het maakproces te kunnen optimaliseren. Herleidbaarheid voor vocht voor zeer lage fracties voor diverse matrixgassen ontbreekt echter nog grotendeels en zal binnen dit project worden ontwikkeld.

Binnen dit project richt VSL zich op:

- Dynamisch gegenereerde gasmengsels van water in diverse matrices in het concentratiebereik van 50 nmol/mol – 5 µmol/mol met behulp van een magnetische permeatiebalans.
- Bepaling enhancementfactoren voor water in argon en stikstof in het bereik van -80 °C tot -30 °C.
- Uitbreiding van het bereik van de primaire vochtgenerator.
- Ingebruikname van een meetmethode voor het kalibreren van trace-moisturesensoren.

Technische voortgang in 2024:

Met de magnetische suspensiebalans zijn lage molfracties vocht gegenereerd met een onzekerheid van 1,8 % ($k = 2$) voor een H₂O-molfractie van 3,8 µmol/mol. Voor lagere molfracties neemt de relatieve onzekerheid toe door desorptie van vocht en diffusie door o-ringen. De vochtstandaarden gegenereerd met de magnetische suspensie balans zijn middels een cavity ring down spectrometer vergeleken met statische vochtstandaarden die zijn gecertificeerd door het vakgebied Thermometrie. Een goede overeenkomst is aangetoond tussen deze twee standaarden en de resultaten zijn vastgelegd in een project deliverable.

Verder is de data van de veldmetingen bij de fabriek van Nippon Gases in Italië en bij Qrometric in Engeland geanalyseerd, waarvan de resultaten zijn vastgelegd in twee project deliverables.

In het kader van thermometrie werden de zogenaamde “enhancement factors” van waterdamp in de matrixgassen N₂ en Ar bij verschillende drukken bepaald. Het gerealiseerde dauwpunt werd bepaald door een “chilled mirror hygrometer” (CMH) bij atmosferische druk (geëxpandeerd) of onder dezelfde druk als de dauwpuntsgenerator. De gemeten enhancement factors werden gebruikt om nieuwe correlatiefuncties (ontwikkeld door de PROMETH2O partner VTT), te valideren. Dit type functie staat aan de basis van nauwkeurige vochtmetingen. Er zijn twee volledige datasets gemeten van -70 °C t/m -30 °C bij 1 bar en 10 bar, voor N₂ en Ar. De onzekerheden zijn bepaald, in nauwe samenwerking met de Data Science and Modelling groep. De gemeten enhancement factoren was van een dusdanig goede kwaliteit om meegenomen te worden bij de validatie van de correlatiefuncties.

De resultaten met de glazen permeatiekamer zijn beter dan vooraf verwacht. De metalen permeatiekamer is momenteel nog niet bruikbaar vanwege sterke adsorptie. Herleidbare formuleringen van de enhancement factoren zijn bepaald en gepresenteerd bij de GAS2024 conferentie in Parijs. Deze zullen binnen VSL worden gebruikt in de reguliere vochtkalibraties. Tenslotte is de primaire vochtstandaard verbeterd. De herleidbare enhancement factoren zijn geïmplementeerd in de vochtkalibraties voor gebruikers waardoor een hoogwaardigere dienst kan worden verleend. Tevens kan hiermee voor toekomstige diensten of researchprojecten een uitgebreider bereik van vocht bij hogere drukken herleidbaar worden gemeten.

Publicaties in 2024:

- Vanuit het consortium zijn twee joint peer-reviewed publicaties en een e-boek (gebaseerd op deliverable D5 “Report on the development and validation of correlation equations for the enhancement of water vapour in N₂, Ar and H₂ in the temperature range from -30 °C to -90 °C and at pressures from 0.1 MPa to above 1 MPa”) geschreven.

4.4.2 HF-metrologie voor toekomstige communicatiebehoeften (FutureCom)

Projectdoel: Het ontwikkelen van een kalibratiedienst voor het herleidbaar meten van RF-eigenschappen van actieve componenten onder omstandigheden, zoals ondervonden tijdens het actuele gebruik.

Looptijd: September 2021 – augustus 2024

Zie het Overzicht van de lopende researchprojecten, hoofdstuk 17 voor de beschrijving van het complete project.

Technische voortgang in 2024:

Meetopstelling en meetsoftware voor de kalibratie van actieve componenten is gereed en metingen aan actieve componenten zijn uitgevoerd tot 20 GHz. Hierbij heeft VSL zelf een actieve impedantietuner ontwikkeld waarbij interferometrie wordt gebruikt voor het realiseren van gewenste impedanties. Het nieuwe probing systeem voor on-wafer kalibraties is ontwikkeld en bijbehorende meetsoftware is gereed. Het probing systeem is vervolgens gebruikt voor het testen van nieuwe probes ontwikkeld door METAS. De Good Practice Guide (GPG) voor de karakterisatie van actieve componenten onder 50 Ω -afwijkend belastingsimpedanties tot 220 GHz is compleet. Het project is inmiddels succesvol afgesloten.

De wijdverbreide implementatie van toekomstige communicatietechnieken zoals 5e generatie (5G) en connected autonome voertuigen stellen hoge eisen aan de nieuwe generatie elektronische radiofrequent (RF) componenten, subsystemen en systemen. Deze dienen nauwkeurig gekarakteriseerd te zijn om gestelde prestaties in 'real world' omstandigheden te leveren. Momenteel hebben NMI's in Europa niet de capaciteit om de benodigde RF-metingen, die nodig zijn om de communicatiesector te ondersteunen, uit te voeren. Dit project zal bijdragen aan metrologie voor actieve RF-componenten door standaardisatie in de communicatietoepassingen te ondersteunen door meetmogelijkheden te bieden om de prestaties van apparaten op realistische wijze te beoordelen en het gebruik van de technologie te bevorderen.

VSL richt zich op de uitbreiding van herleidbaarheid van S-parameter metingen naar actieve componenten. Waarbij voorheen RF-karakterisering van actieve componenten in het laboratorium voldeed voor het ontwikkelen van communicatienetwerken, is er nu behoefte om deze nauwkeuriger en onder realistische omstandigheden te karakteriseren. Dit vereist van het huidige meetsysteem, naast de conventionele lineaire, ook niet-lineaire meetmogelijkheden. Concreet zullen een load-pull meetsysteem en software voor herleidbaar kalibratie van actieve componenten tot 20 GHz worden ontwikkeld. Daarmee zal een kalibratiedienst worden opgezet voor het herleidbaar RF-eigenschappen meten van actieve componenten onder omstandigheden, zoals ondervonden tijdens het actuele

Publicaties in 2024:

- D. Poduval, F. Munoz, G. Rietveld, F.A. Mubarak, "Evaluating Aging Uncertainty of Impedance Standard Substrate in On-wafer S-parameter Measurements", in Proc. of the conference on precision electromagnetic measurements (CPEM), 2024, USA.
DOI: [10.1109/CPEM61406.2024.10646142](https://doi.org/10.1109/CPEM61406.2024.10646142)

Presentaties in 2024:

- D. Poduval, F. Munoz, G. Rietveld, F.A. Mubarak, "Evaluating Aging Uncertainty of Impedance Standard Substrate in On-wafer S-parameter Measurements", in Proc. of the conference on precision electromagnetic measurements (CPEM), 2024, USA. (poster presentatie)

4.4.3 HF-metrologie voor supergeleidende quantumcircuits

Projectdoel: Het ontwikkelen van in-situ S-parameter metrologie bij millikelvintemperaturen voor quantumtoepassingen.

Looptijd: 2021-2024

De vooruitgang van kwantum technologieën en computers impliceert een aanzienlijke toename van hoogfrequente componenten en kabels, die worden gebruikt bij cryogene temperaturen tot tientallen millikelvin. Het opschalen van kwantumcomputers stelt hoge eisen aan warmtebelasting, ruimte en signaalintegriteit onder deze extreme omstandigheden. Toch bestaat er vandaag geen gevestigde technologie, die nauwkeurige golfvormgeneratie en signaalmetrologie ter plaatse bij cryogene temperaturen kan uitvoeren. Hier worden nieuwe microgolfmetrologie-instrumenten voor cryogene toepassingen voorgesteld, sommige zelfs tot millikelvintemperaturen. In dit project zal nauw worden samengewerkt met TU Delft.

VSL richt zich in dit project op het ontwikkelen van een methode om referentiewaarden van kalibratiestandaarden te bepalen voor een cryogene omgeving:

- Het ontwerpen van on-wafer kalibratiestandaarden geschikt voor S-parameterkalibratie in cryogene omgevingen.
- Het ontwikkelen en optimaliseren van een meetmethode voor on-wafer S-parameterkalibratie in cryogene omgevingen.
- Het identificeren van onzekerheidsbronnen en methoden om de invloed van relevante onzekerheden te bepalen bij on-wafer S-parameterkalibratie in cryogene omgevingen, zoals bijvoorbeeld kabels, referentiestandaarden, etc.

Technische voortgang in 2024:

De opstelling voor S-parameterkalibraties bij 77 K is gereed. Ook is de meetsoftware voor het volledig automatisch uitvoeren van 2-poort S-parameter kalibraties compleet. Eerste testmetingen van de nieuwe opstelling zijn in orde gebleken. Verder is er onderzoek naar diverse onzekerheden uitgevoerd en waardevolle kennis opgebouwd over het onzekerheidsraamwerk voor een cryogene omgeving. Een tweede opstelling voor S-parameter kalibraties bij 4 K is ook ontwikkeld en diverse testen zijn inmiddels uitgevoerd. Modellen voor het bepalen van referentiewaarden van kalibratiestandaarden onder de 77 K en 4 K temperaturen zijn gereed. Ook zijn deze standaarden onder kamertemperatuur gekalibreerd en herleidbaar naar de VSL primaire standaarden voor S-parameter kalibraties. Eerste resultaten zijn gepubliceerd in een tweetal publicaties.

Publicaties in 2024:

- L. Oberto et al., "Measurement and Calibration Approaches for Two-Port Scattering Parameters at mK Temperatures," 2024 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM), Denver, CO, USA, 2024, pp. 1-2, doi: 10.1109/CPEM61406.2024.10646000.

Presentaties in 2024:

- L. Oberto et al., "Measurement and Calibration Approaches for Two-Port Scattering Parameters at mK Temperatures," 2024 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM), Denver, CO, USA, 2024, pp. 1-2, doi: 10.1109/CPEM61406.2024.10646000. Presentatie op de CPEM: Special Session: Metrology for Promoting Scalability of Superconducting Quantum Computers op 9 juli 2024

4.4.4 Efficiëntiemetingen aan vermogenselektronica (Powerized)

Projectdoel: Het ontwikkelen van betrouwbare meetmethoden voor het meten van energieverliezen in hoog-efficiënte vermogenselektronica.

Looptijd: Januari 2023 – december 2025

Vermogenselektronica speelt een cruciale rol in de energietransitie, onder andere in het aansluiten van hernieuwbare energiebronnen als zonnepanelen aan het elektriciteitsnet, bij elektrisch vervoer, de generatie van waterstof, en het realiseren van efficiënte LED-verlichting. Als onderdeel van de Key Digital Technologies Joint Undertaking (KDT JU) van de EU en nationale overheden werkt VSL met een groot consortium samen in het project Powerized aan de ontwikkeling van hoog-efficiënte vermogenselektronica.

VSL richt zich in het Powerized project op de betrouwbare evaluatie van de efficiëntie van de nieuw ontwikkelde vermogenselektronica, in nauwe samenwerking met de Universiteit Twente en een aantal Nederlandse industriële spelers (Signify, ProDrive, Power Research Electronics). VSL is daarbij trekker van het horizontale thema (cross domain topic) "Tools and Measurement". Met nieuwe meefaciliteiten voor betrouwbare meting van de efficiëntie van vermogenselektronica helpt VSL de Nederlandse industrie om state-of-the-art elektronica te ontwikkelen met aantoonbaar hoge efficiëntie en lage verliezen. VSL ondersteunt daarmee de positie van de Nederlandse vermogenselektronica in de energie transitie.

Technische voortgang in 2024:

Er is gestart met de kalibratie van de onderdelen van de referentieopstelling voor het meten van de verliezen van hoog efficiënte vermogenslektronica. De stroomsensoren zijn bij DC gekalibreerd. Momenteel wordt de nauwkeurigheid bij 50 Hz en hogere frequenties onderzocht.

Er zijn een aantal overleggen georganiseerd met de partners uit het PowerizeD cross domain topic “meten” om de voortgang van het werk te borgen. Verder is actief deelgenomen aan de tweewekelijkse stuurgroep overleggen van het PowerizeD project, de technische voortgangskonferentie in juni 2024 bij KTH, Zweden en de General Assembly meeting in november.

Er is regelmatig over de voortgang van het werk gerapporteerd: updates van de VSL projectrisico's, updates naar de WP-leiders waaronder het VSL-werk valt, en een voortgangspresentatie op de eerste formele project review meeting in februari 2024 bij IMEC, Leuven, die zeer goed ontvangen werd door de aanwezige EU officer en reviewers.

In februari en september zijn Signify en ProDrive bezocht, twee Nederlandse partners in het PowerizeD project, om beter zicht te krijgen welke behoeften ze hebben aan efficiëntiemetingen van de vermogenslektronica die zij ontwikkelen binnen het PowerizeD project.

Al met al is goede voortgang gemaakt in de realisatie van de referentiemeetopstelling voor meting van verliezen van hoog efficiënte vermogenslektronica: breedbandige vermogensmeter en stroomsensoren zijn aangeschaft en getest op hun functionaliteit.

Het project zal in 2025 worden afgerond met de volgende activiteiten:

- Voltooiing van de kalibratie van de breedbandige stroomsensoren en breedbandige vermogensmeter.
- Meting van de efficiëntie van een Infineon USB lader en van vermogenslektronica oplossingen
- Madhat Alimawi, Roelof Grootjans, en Gert Rietveld, “An Alternative Calorimetric Approach for Power Loss Measurement of Ultra-efficient Power Electronics,” abstract paper voor de 2024 Conference Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2024), Denver, USA, pp. 1 – 2 (2024).
DOI: [10.1109/CPEM61406.2024.10646036](https://doi.org/10.1109/CPEM61406.2024.10646036)

Presentaties in 2024:

- Gert Rietveld, “PowerizeD first project review – status and progress of cross domain topics 4.1-4.4”, mondelinge presentatie op de eerste formele PowerizeD project review meeting, februari 2024, Leuven, België.
- Gert Rietveld, “Measurement equipment and standards”, poster presentatie op de eerste formele PowerizeD project review meeting, februari 2024, Leuven, België.
- Gert Rietveld, “Powerized Cross Domain Topic 4.3: Measurement Equipment and Standards”, poster presentatie op de EURAMET EMN on Smart Electricity Grids general meeting, mei 2024, Delft, Nederland.
- Rui Qiang, Thiago Batista Soeiro, Gert Rietveld, “Loss Characterization of Wide Bandgap Semiconductor Devices,” poster presentatie op de 2024 PowerizeD Workshop and General Assembly, juni 2024, Stockholm, Zweden.
- Madhat Alimawi, Roelof Grootjans, Gert Rietveld, “An Alternative Calorimetric Approach for Power Loss Measurement of Ultra-efficient Power Electronics,” poster presentatie op de 2024 PowerizeD Workshop and General Assembly, juni 2024, Stockholm, Zweden.

4.4.5 HF-metrologie voor toekomstige on-wafer industriële toepassingen (OnMicro)

Projectdoel: Het ontwikkelen van een kalibratiedienst voor het herleidbaar meten van RF-eigenschappen van actieve componenten onder omstandigheden zoals ondervonden tijdens het actuele gebruik.

Looptijd: Juni 2024 – mei 2027

Halfgeleiderchips worden gebruikt in veel gevestigde en opkomende toepassingen, bijvoorbeeld 6G-telecommunicatie, radarsensoren voor auto's, in de ruimte geplaatste radiometers voor aardobservatie en draagbare elektronica voor de gezondheidszorg. Er is momenteel echter een gebrek aan herleidbaar meettechnieken voor millimetergolf- en Terahertz (THz) on-wafer geïntegreerde circuits (IC's), vooral samengestelde halfgeleiders. Om de Europese halfgeleiderindustrie te versterken en de ontwikkeling van halfgeleider technologieën van de volgende generatie te vergemakkelijken, zijn dus nieuwe nauwkeurige en herleidbaar meettechnieken voor on-wafers componenten nodig, samen met gebruikershandleidingen voor on-wafer metingen. Bovendien zijn verbeterde methoden nodig voor de karakterisering van samengestelde transistors boven 110 GHz, en voor nieuwe 2D-, dunne film- en halfgeleidermaterialen.

VSL richt zich op de uitbreiding van herleidbaarheid van S-parameter metingen naar on-wafercomponenten. Hierbij wordt een volledig autonoom probingsysteem ontwikkeld voor het realiseren van consistent meetonzekerheden benodigd voor on-waferkalibratiediensten. VSL ontwikkelt eigen referentie standaarden voor realiseren van een herleidbaar kalibratie en het bepalen van meetonzekerheden.

Technische voortgang in 2024:

Het project is gestart op 1 juni en er is vrijwel direct begonnen met de ontwikkeling van het nieuwe probing station software door het AS-team. Er is gekozen voor C# als programmeertaal en het nieuwe programma omvat onder andere een automatische "landing" functie waarna, op basis van alle data, de kwaliteit van de landing wordt bepaald. Hierbij wordt ook gekeken met een camerasysteem dat kijkt naar de markers die de probe achterlaat op het substraat. De collega's van DSM ondersteunen met de Machine Learning (ML) aspecten van de code.

Projectpartner Form Factor ondersteunt VSL door het leveren van substraten en probes. Ook heeft VSL zelf nog een ISS-substraat ontworpen en gefabriceerd met meerdere uitlijningsmarkers ter ondersteuning van de automatisering.

4.4.6 HF-metrologie voor 6G ontwikkeling (RF46G)

Projectdoel: Het ontwikkelen van een kalibratiedienst voor het herleidbaar meten van S-parameters van 1- en 2-poort componenten tot 110 GHz.

Looptijd: mei 2024 – april 2027

De volgende generatie (6G) draadloze communicatiesystemen is momenteel in ontwikkeling en zal naar verwachting aan het begin van het volgende decennium worden ingezet. Het 6G technologie streeft naar grensverleggende specificaties om moderne, digitale en zeer geïntegreerde toepassingen te ondersteunen en mogelijk te maken. Het voorgestelde onderzoek wil de metrologische ondersteuning voor primaire RF-grootheden – zoals RF-vermogen, S-parameters en golfvormgrootheden – uitbreiden in meetsystemen met coaxiaal connectorinterfaces om de uitdagingen van de 6G-technologie het hoofd te bieden en ondersteuning bieden aan de industrieën die betrokken zijn bij de 6G R&D.

VSL richt zich op de uitbreiding van herleidbaarheid van S-parameter metingen naar 110 GHz. Hierbij wordt een huidige Vector Network analyser (VNA) meetsysteem uitgebreid van 50 GHz naar 110 GHz. Hiernaast wordt ook een coaxiaal-transmissielijnmodel uitgebreid voor het bepalen van referentiewaarden voor 1.85 mm en 1.0 mm connectoren. Ook zal een haalbaarheid studie uitgevoerd worden naar het verhogen van de frequentie grenzen van 3.5 mm connectoren naar hoger frequenties dan nu het geval is. Ook wordt het onzekerheidsraamwerk voor verhoogde frequenties doorontwikkeld en wordt het meetsysteem tot 110 GHz volledig gekarakteriseerd. Uiteindelijk zullen er nieuwe CMCs ingediend worden bij het BIPM voor het aanbieden van S-parameter kalibratiedienst tot 110 GHz.

Technische voortgang in 2024:

De kick-off meeting is eind mei georganiseerd bij PTB, waarna het project is gestart. Er zijn diverse overleggen geweest voor fabricage van benodigde test-poort adapters. Hierbij zijn fabrikanten

benaderd die deze zullen fabriceren. Er is een systeem ontwerp gemaakt voor het uitvoeren van verzwakkingsmetingen tot 40 GHz. Hierbij wordt gebruik gemaakt van down-conversion mixer stage voor het behalen van nodige nauwkeurigheid. Als validatie, wordt de VNA methode gebruikt. Er zijn EM-simulaties uitgevoerd voor het ontwikkelen van een berekenbaar model van transmissielijnen. Deze worden vervolgens ingezet in coaxial kalibraties tot 38 GHz. Er zijn geen metingen uitgevoerd omdat benodigde test-poort adapters nog niet gefabriceerd zijn.

Over het algemeen verlopen de werkzaamheden conform planning. De nodige componenten worden door fabrikanten ontwikkeld en aangeleverd. Verder zijn er benodigde EM-simulaties uitgevoerd voor het bepalen van referentiemodellen voor HF-kalibraties.

4.4.7 Hybride 4D-fabricagemethode (AMPERE)

Projectdoel: Het ontwikkelen van een in-line meet- en testconcept voor een hybride 4D-fabricage-faciliteit.

Looptijd: Januari 2021 – juli 2024

Het AMPERE-project zal betrouwbare en schaalbare hybride 4D-productiemethoden ontwikkelen voor slimme systemen met ingebbede robuuste elektronica. De nieuwe hybride fabricageprocessen van AMPERE zullen gebruik maken van Additive Manufacturing (AM, ook wel 3D-printen genoemd) als een kernproductietechnologie die kan worden opgeschaald naar volumeproductie, gecombineerd met de 4e dimensie (integratie van elektronische en optische functionaliteiten). Het ontwikkelde proces maakt gebruik van Closed Loop Controls om een betrouwbare productie in één keer goed te garanderen.

Er zijn vier specifieke doelstellingen bepaald om het AMPERE-doel te bereiken:

- Ontwikkeling en integratie van essentiële technologie voor schaalbare hybride 4D-productie die zowel flexibel als kosteneffectief is, van massamaatwerk in kleine series tot grotere productievolumes, terwijl wordt voldaan aan de werkelijke behoeften van de industrie.
- Slimme digitale productieprocessen voor 4D-producten (geïntegreerde mechanische, elektrische en optische functionaliteiten).
- Ontwikkeling van schaalbare en betrouwbare industriële productiesystemen in combinatie met de essentiële technologie en slimme processen.
- Demonstratie van de hybride 4D-productiebenadering in drie innovatieve productcases die verschillende toepassingen en sectoren bestrijken (LED-armaturen & signaal- en vermogenslektronica & medische apparaten).

Binnen het project zal VSL haar diepgaande kennis en expertise op het gebied van metrologie in industriële productie delen met de partners in het project. VSL zal zich richten op in-line en in-proces metrologie om verbeterde procesbeheersing en verbeterde productiestatistiek mogelijk te maken, die voortvloeit uit soortgelijke projecten op dit gebied, zoals geautomatiseerde in-line metrologie voor productie op nanoschaal (AIM4NP), of Metrology voor sterk parallelle fabricage (MetHPM). Gedurende het project zal VSL nieuwe inzichten ontwikkelen met betrekking tot de toegevoegde waarde van betrouwbare en herleidbare metrologie voor de Europese (hightech) maakindustrie. In het bijzonder zullen de kennis en ervaring van het AMPERE-project worden gebruikt om de projectpartners te helpen bij het selecteren en correct implementeren van metrologie wanneer zij de geavanceerde productietechnieken van het project toepassen in hun productie- en fabricageproces. Zo kan de Europese maakindustrie toonaangevend blijven op dit gebied waar metrologie een essentiële rol speelt.

Technische voortgang in 2024:

VSL heeft onderzoek verricht aan geprinte testproducten middels een confocale optische afstandssensor die op de 3D-CMM is gemonteerd. Daarbij is een methode ontwikkeld om de datastroom van de confocale sensor te combineren met de coördinaten van de 3D-CMM. Hiermee werd het mogelijk om onderzoek te doen aan de meetnauwkeurigheid van de confocale sensor. Een bevinding is dat de confocale afstandssensor behoorlijk lineair is met een afwijking kleiner dan 0,005 mm, maar dat de schalingsfactor een kleine fout kan bevatten waardoor absoluut de afwijking kan

oplopen tot 0,02 mm in de uiterste positie van het bereik van de sensor. De hoekgevoeligheid op de afstandsmeting is ook getest, omdat dit voor de geprinte producten met veel structuur van invloed is.

De confocale sensor bleek slecht toepasbaar op de geprinte onderdelen van de project partner, omdat de gebruikte kunststoffen deels transparant waren en de oppervlakte een hoge ruwheid heeft vanwege de gebruikte printresolutie. De resultaten zijn met de project partner besproken.

4.4.8 De grenzen van optische nanometrologie verleggen (POLight)

Projectdoel: Het ontwikkelen van nieuwe optische technieken voor dimensionele metrologie van nanostructuren door gebruikmaking van far-field detectietechnieken.

Looptijd: September 2021 – augustus 2024

Innovatieve apparaten, zoals nanochips, geheugens met hoge capaciteit, nieuwe materialen en toekomstige point-of-care-tools zijn allemaal afhankelijk van het vermogen om materie op nanoschaal vorm te geven. Daarom heeft de Europese Commissie vier Key Enabling Technology (KET's, d.w.z. nanotechnologie, micro-nano-elektronica, fotonica en geavanceerde materialen) geïdentificeerd als strategisch belangrijk voor de Europese Unie. De snelle technologische vooruitgang van deze vier KET's creëert momenteel echter een "metrologiekloof" in vergelijking met de vooruitgang bij het ontwikkelen van metrologiemethoden, die cruciaal zijn voor het valideren van de ontwikkeling van KET's. Dit project pakt dit probleem aan door nieuwe methoden te ontwikkelen om de metrologiekloof te overbruggen en op zijn beurt KET-innovatie te bevorderen. Meer specifiek zal dit project de grenzen van optische meetmethoden verleggen door een nieuwe generatie optische metrologiesystemen te realiseren, met ongekende prestaties op het gebied van ruimtelijke resolutie, traceerbaarheid, betrouwbaarheid en robuustheid.

Het algemene doel van dit project is om de grenzen van optische meetmethoden te verleggen door een nieuwe generatie optische metrologiesystemen te realiseren, met ongekende prestaties op het gebied van ruimtelijke resolutie, traceerbaarheid, betrouwbaarheid en robuustheid. Specifiek:

- Nieuwe methoden realiseren, die gelijktijdig gebruik maken van de volledige diversiteit aan informatie, die beschikbaar is in elektromagnetische velden in het optische domein. Dit omvat spectrale diversiteit (breed en continu bereik van golflengten), hoekdiversiteit (van lage tot hoge NA (Numerieke Apertuur), ruimtelijke diversiteit (gemanipuleerde amplitude- en faseprofielen, exploitatie van topologische informatie gedragen door een veld), polarisatiediversiteit (niet-triviale lokale polarisatietoestanden) en metamaterialen versterkte verstrooiing.
- De metrologische grondslagen leggen voor opkomende methoden, zoals iteratieve fasegevoelige methoden en 'structured light' methoden. Dit vereist onder meer het in kaart brengen van de overdracht van de fase-informatie van het nabije veld naar het verre veld in licht-materie-interactieprocessen, evenals het creëren van nieuwe artefacten (gebieds- en profielstandaarden) en geavanceerde inversie-algoritmen (bijv. Bayesiaanse inversie, gebaseerd op machine learning), het definiëren van de kalibratie-onzekerheid en het vaststellen van de juiste metrologieketen om deze innovatieve methoden te valideren.
- Het potentieel onderzoeken van inferentiemethoden en machine-learningmethoden, die worden toegepast op optische scatterometrie voor dimensionele metrologie en bepaling van optische constanten.

In dit project leidt VSL een werkpakket dat zich richt op Far-field optische nanometrologie binnen het Rayleigh-regime. Scatterometriespecialisten ontwikkelen nauwkeurige methoden voor het meten van nanostructuren met behulp van far-field-verlichting, far-field-detectie optische methoden, zoals optische scatterometrie met gestructureerde verlichting, coherente Fourier-scatterometrie (CFS) en ptychografie. VSL neemt ook actief deel aan de ontwikkeling van innovatieve beeldvormingsmethoden op basis van engineering van de ruimtelijke vorm van licht in het klassieke en quantumdomein.

Technische voortgang in 2024:

In de samenwerking met de TU Delft is de hyperspectrale scatterometer uitgelijnd en zijn er metingen uitgevoerd. De uitlijning van de setup is verbeterd door middel van focus-metingen door de setup heen. De 5 DOF (degrees of freedom) sample stage is ingebouwd samen met de lichtmodulators. Op basis van de eerste metingen is er een publicatie in voorbereiding waarin de fundamentele eigenschappen, procedures en data processing staan beschreven. Deze publicatie wordt in de komende periode ingediend. Ook zijn de resultaten hiervan zijn gedeeld in de "LINX & Synoptics Technology Workshop". Daarnaast is er een meeting met een van de stakeholders geweest waarin o.a. het belang van NA-kalibraties is besproken.

Publicaties in 2024:

- L. Siaudinyte and P. E. Hansen. Recent progress in optical nanometrology for the semiconductor industry. Measurement: Sensors 101607, ISSN 2665-9174 2024 . DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101607>.
- T. A. van der Sijs, J. Rafighdoost, L. Siaudinyte, H. P. Urbach, S. F. Pereira, and O. El Gawhary. Broadband coherent Fourier scatterometry: a two-pulse approach. Submitted Review of scientific instruments.

Presentaties in 2024:

- P. E. Hansen, T. Pahl, L. Fu, A. T. Rømer, F. Rosenthal, L. Siaudinyte, S. Reichelt, P. Lehmann, M. Karamahmedovic. Digital Twins for 3D Confocal Microscopy. Proc. of SPIE. Optics and Photonics for Advanced Dimensional Metrology III, 9 - 11 April 2024, Strasbourg, France.
- L. Siaudinyte and P. E. Hansen. Recent progress in optical nanometrology for the semiconductor industry. IMEKO 2024 XXIV World Congress. 26-29 August 2024, Hamburg, Germany.
- T. Käseberg, B. Bodermann, M. Sturm, M. Wurm, T. Siefke, L. Siaudinyte, A. Trantum -Rømer and P. E. Hansen. Comparison measurements for hybrid evaluation approaches in optical nanometrology. The European Optical Society Annual Meeting EOSAM 2024, 9-13 September 24, Naples, Italy.

4.4.9 Herleidbaarheid voor optische microscopie (TracOptic)

Projectdoel: Het karakteriseren van de zelfgebouwde hyperspectrale scatterometer en gereedmaken voor herleidbare dimensionele metingen aan geselecteerde structuren van enkele micrometers tot tientallen millimeters.

Looptijd: Juni 2021 – mei 2024

Om te kunnen blijven concurreren, streven Europese fabrikanten ernaar om hun productieprocessen voortdurend te verbeteren. De oppervlaktetopografie van een onderdeel kan een diepgaand effect hebben op de functie van het onderdeel. Dit geldt voor een breed scala van industrieën (zoals precisietechniek, automotive en medisch). Geschat wordt dat oppervlakte-effecten ervoor zorgen dat 10% van de gefabriceerde onderdelen defect raakt, wat financiële implicaties heeft. Optische meetsystemen zijn wijdverspreid in oppervlakte- en coördinatenmetrologie omdat ze snel zijn, met een hoge resolutie en contactloos (aspecten die essentieel zijn voor de fabriek van de toekomst). Helaas worden optische metingen in de industrie niet vaak gebruikt omdat ze niet herleidbaar zijn. Dit komt door de complexiteit van de interactie tussen het oppervlak van het object en het meetsysteem. Dit project heeft tot doel de herleidbaarheid van 3D-ruwheids- en dimensionale metingen te verbeteren met behulp van optische 3D-microscopie en optische afstandssensoren. Methoden voor gegevensbeoordeling en onzekerheidsschatting zullen worden ontwikkeld en toegankelijk worden gemaakt voor de industrie door middel van gidsen met goede praktijken, publicaties en trainingen. De algemene doelstelling van het project is om herleidbare oppervlakteruwheid en dimensionale metingen mogelijk te maken met behulp van optische 3D-microscopie en optische afstandssensoren, met speciale nadruk op het geven van richtlijnen voor de selectie van de meest geschikte instrumenten voor een bepaald doel.

VSL leidt een werkpakket dat zich richt op de karakterisering van de meetmogelijkheden van 3D optische instrumenten. De Lengtegroep werkt aan karakterisering van bollen en ruwheidsstandaarden door microscopie en Atomic Force Microscopy (AFM)-metingen uit te voeren.

Concrete stappen:

- Het bepalen van de afhankelijkheid van de ruimtelijke frequenties van de dimensionele metingen met het optische meetsysteem.
- Het bepalen van de getrouwheid voor wat betreft vorm en schaling van de dimensionele metingen met het optische meetsysteem.
- Het bepalen van het residu en de ruis van de dimensionele metingen met het optische meetsysteem.
- Het bepalen van de hardware-afhankelijkheid, zoals NA (Numerical Aperture), vergroting en oriëntatie van het meetobject, van de ruimtelijke lichtverdeling van het meetsysteem.
- Het bepalen van de afhankelijkheid van de materiaaleigenschappen en specifieke karakteristieken van het meetobject, zoals oppervlakteruwheid.
- Daarna zullen de kalibratie-instructies en het onzekerheidsbudget worden opgesteld voor de optische meetfaciliteit, bestaande uit de zelfgebouwde hyperspectrale scatterometer, voor geselecteerde meetobjecten, zoals optische lenzen.

Technische voortgang in 2024:

Zoals eerder reeds gerapporteerd kon VSL, door onduidelijke verwachtingen m.b.t. sample afmetingen, niet volledig meedoen aan het confocale-microscopievergelijk tijdens het project. Om toch onze capabilities te kunnen aantonen zijn we nog steeds in afwachting van nieuwe samples (silicon wafer-based) zodat we met een aansluitende vergelijk kunnen meedoen. Er zal gekeken moeten worden waar we dit buiten het inmiddels beëindigde project om kunnen oppakken.

In samenwerking met DFM is er een methode ontwikkeld voor “through-focus” microscopiemetingen. Deze is vergeleken met een andere methode voorgesteld door de universiteit van Kassel en Stuttgart. Dit werk is in een presentatie op de SPIE Photonics 2024 gedeeld.

VSL heeft ook een rapport voorbereid over de karakterisatie van ruwheid en dimensionele metrologie (bv.: maximum slope, curvature, lateral bandwidth, noise, BDRF, topografic spatial resolution en lengte meetfouten) van confocale microscopen. Dit rapport is ingediend en geaccepteerd door EURAMET. Daarnaast heeft VSL succesvol bijgedragen aan het AFM-vergelijk.

Ook heeft VSL bijgedragen aan de good practice guides voor

- 1) “the selection of instrumentation for optical roughness measurements with Confocal Microscopy (CM), Coherent Scanning Interferometry (CSI) and Focus Variation (FV)”
- 2) “the selection of instrumentation for dimensional measurements with CM, CSI, FV and Optical Distance Sensor (ODS)”
- 3) “the estimation of measurement uncertainty for optical dimensional measurements with CM, CSI, FV and ODS with a target uncertainty of 100 nm”

Daarnaast heeft VSL een vergelijk georganiseerd tussen project partners op het gebied van “machined technical surfaces”. De samples zijn door een stakeholder aangeleverd en de resultaten zijn gerapporteerd in het rapport met de titel: “Areal surface texture of industrial products”.

De afsluitende projectmeeting heeft plaats gevonden in mei waar een van de gedeelde uitkomsten is dat er meer tijd nodig is geweest (bij alle partners) om alle doelen te realiseren dan vooraf gepland. Deze uitloop is mede veroorzaakt door tegenslagen in de dataverwerking en (grote) verschillen in de meetopstellingen bij verschillende partners.

Presentaties in 2024:

- P. E. Hansen, T. Pahl, L. Fu, A. T. Rømer, F. Rosenthal, L. Siaudinyte, S. Reichelt, P. Lehmann, M. Karamehmedovic. Digital Twins for 3D Confocal Microscopy. Proc. of SPIE. Optics and

Photonics for Advanced Dimensional Metrology III, 9 - 11 April 2024, Strasbourg, France, 12997-21.

- F. Rosenthal, T. Pahl, T. Eckhardt, S. Hagemeyer, J. Compagnone, T. Czasch, M. Diehl, R. Kooops. Universal Fourier optics model for virtual confocal microscopes. Optics and Photonics for Advanced Dimensional Metrology III, 9 - 11 April 2024, Strasbourg, France, 12997-22.
- Promotievideo over scatterometrie [<https://www.youtube.com/watch?v=m6SXcBmTIP8>]

4.4.10 Herleidbare optische constanten en nanolaagjes (ATMOC)

Projectdoel: Het realiseren van de herleidbaarheid van hyperspectrale scatterometriemetingen voor het bepalen van de complexe brekingsindex van halfgeleidermaterialen en bijdragen aan een database voor materiaaleigenschappen in het golflengtebereik van zichtbaar tot infrarood.

Looptijd: Juli 2021 – juni 2024

De optische en halfgeleiderindustrieën gebruiken innovatieve materialen en complexe nanostructuren in hun producten, waarvan de optische eigenschappen moeilijk te meten en vaak niet nauwkeurig bekend zijn. Dit project ontwikkelt geavanceerde wiskundige methoden om deze materialen traceerbaar te karakteriseren voor golflengtebereiken van zachte röntgenstraling tot infrarood. Dit zal worden bereikt door het creëren van een database van optische constanten met bijbehorende onzekerheden voor bulkmaterialen en ultradunne-filmsystemen en industrieel relevante datasets. Deze database biedt relevante industrieën de mogelijkheid om simulaties uit te voeren en uiteindelijk nieuwe materialen met op maat gemaakte eigenschappen te ontwikkelen. De algemene doelstelling van het project is het ontwikkelen van herleidbare meettechnieken voor optische constanten van dunnefilmsystemen en nanostructuren en deze technieken te gebruiken ter ondersteuning van de introductie van een verbeterde database met optische eigenschappen voor industriële gebruikers.

VSL leidt het werkpakket dat zich richt op de herleidbaarheid van geavanceerde op fotonen gebaseerde metrologie. Het doel van dit werkpakket is het ontwikkelen van traceerbare reflectometers, Mueller-ellipsometers en scatterometers. Alle meettechnieken die nodig zijn om een betrouwbare bepaling van optische constanten in dunnefilmmaterialen te verkrijgen, inclusief monsters met complexe geometrieën, zullen in dit werkpakket worden ontwikkeld en gekarakteriseerd. VSL scatterometriespecialisten in de Lengtegroep zullen werken aan de karakterisering van de scatterometer en herleidbare metingen van de nanostructuren. De Data Science and Modelling groep werkt aan geavanceerde inverse modellering en onzekerheidsevaluatie.

Technische voortgang in 2024:

Er is een samen met 19 co-auteurs een publicatie ingediend met de titel "Instrumentation and uncertainty evaluation for absolute characterization of thin films and nanostructured surfaces in advanced optical metrology". Door het grote aantal auteurs en de complexiteit van de inhoud is er een kleine vertraging opgetreden. De publicatie gaat over een combinatie van optische meettechnieken en een vergelijking van gelaagde samples met herleidbare geometrische reconstructie. Case study 2 is uitgevoerd door het meten van gefabriceerde nano-structuren en deze te vergelijken met de DFM resultaten. Ook is de inverse modellering verder ontwikkeld en is de output van de modellering gevalideerd met referentie software van DFM. Uit beide modellen kwamen vergelijkbare resultaten.

VSL heeft D4 (Good practice guide on traceable reflectometry, Mueller ellipsometry and scatterometry as reliable and traceable thin-film metrology technique in the soft X-ray to IR spectral range) opgesteld waarin het onzekerheidsbudget en de impact van de foutenbronnen op de meetresultaten wordt geadresseerd.

Publicaties in 2024:

- J. Xu, A. Refino, A. Delvallee, S. Seibert, Ch. Schwalb, P.- E. Hansen, M. Foldyna, L. Siaudinyte, G. Hamdana, H. Wasisto, J. Kottmeier, A. Dietzel, T. Weimann, J. Prussing, H. Bracht and E. Peiner. Deep-reactive ion etching of silicon nanowire arrays at cryogenic temperatures. Appl. Phys. Rev. 11, 021411 (2024); doi: 10.1063/5.0166284 [

<https://pubs.aip.org/aip/apr/article/11/2/021411/3283096/Deep-reactive-ion-etching-of-silicon-nanowire>]

- P.E. Hansen, L. Siaudinyte, S. Heidenreich, V. Soltwisch, H. W. Lokhorst, A. Tiwari, I. Makhotkin, A. Mattila, A. Lassila, S. Glabisch, S. Schroder, S. Brose, E. Nolot, T. Siefke, M. Asar, S. Memis, F. Yıldız, M., Schiek, A. T. Rømer. Instrumentation and uncertainty evaluation for absolute characterization of thin films and nanostructured surfaces in advanced optical metrology (Revised and submitted)

Presentaties in 2024:

- Promotievideo over scatterometrie [<https://www.youtube.com/watch?v=m6SXcBmTIP8>]

4.4.11 Lensloze afbeelding van nanostructuren met röntgenstraling (LINX)

Projectdoel: Het deelnemen aan de gebruikerscommissie van het NWO project “Lensless imaging of 3D nanostructures with Soft X-Rays” (LINX) ter verbreding van de kennis binnen VSL op het gebied van ptychografie en het ondersteunen van het project door het geven van input en met metingen.

Looptijd: 2018 – 2024

Het LINX project doet onderzoek naar lensloze afbeelding van nanostructuren met behulp van ptychografie. Daarbij wordt zachte röntgenstraling gebruikt in combinatie met slimme rekenmethoden.

VSL neemt deel aan de gebruikerscommissie en ondersteunt het project door het uitvoeren van AFM referentiemetingen van samples die gebruikt worden in het project voor het uittesten van nieuwe optische meettechnieken.

Technische voortgang in 2024:

Er is over de technische voortgang gerapporteerd via on-line bijeenkomsten met de gebruikerscommissie. Voor VSL is de in-kind bijdrage uitgevoerd welke bestond uit metingen met de AFM aan samples van het projectconsortium.

In september 2024 vond de afsluitende projectvergadering plaats aan de TU Delft, waar de vervolgstappen met het consortium werden besproken.

4.4.12 Hyperspectrale coherente Fourier scatterometrie en ptychografie (Synoptic Optics)

Projectdoel: Het deelnemen aan de gebruikerscommissie van het NWO project “Subwavelength and 3D imaging” (Synoptic Optics) ter verbreding van de kennis binnen VSL op het gebied van scatterometrie en ptychografie en het ondersteunen van het project door het geven van input en ondersteunen bij metingen.

Looptijd: 2021 – 2024

In het Synoptic Optics project worden nieuwe optische technieken ontwikkeld voor het meten van objecten, waarbij gebruik gemaakt wordt van alle eigenschappen van het gebruikte licht (intensiteit, polarisatiedraaiing enz.) tegelijk. Sub-project 3 heeft als onderwerp “superresolutiometrologie van nanostructuren en snelle driedimensionale hoge-resolutie beeldvorming van halfgeleiderapparaten”.

VSL neemt deel aan de gebruikerscommissie van sub-project 3 en werkt samen met TU Delft op het gebied van ptychografie. Een promovendus van TU Delft verricht metingen in het VSL laboratorium onder begeleiding van VSL medewerkers en gebruikt de verkregen data voor de ontwikkeling van een ptychografie algoritme.

Technische voortgang in 2024:

VSL heeft deelgenomen aan de gebruiksbijeenkomsten en inhoudelijk feedback gegeven. Daarnaast is er deelgenomen aan de gezamenlijke LINX & Synoptics Technology Workshop waar, onder andere, de VSL resultaten in de samenwerking met de TU Delft zijn gepresenteerd.

Publicaties in 2024:

- T. A. van der Sijs, J. Rafighdoost, L. Siaudinyte, H. P. Urbach, S. F. Pereira, and O. El Gawhary. Broadband coherent Fourier scatterometry: a two-pulse approach. Submitted to "Review of scientific instruments".

4.5 Digitalisatie en Connectiviteit

4.5.1 Nauwkeurige positionering door draadloze tijdstransfer (Super-GPS2)

Projectdoel: Deelname aan de gebruikerscommissie van het NWO-project "Accurate positioning using virtually ultra-wideband radio signals" (SuperGPS-2) en verkenning van de mogelijkheden voor draadloze tijdstransfer.

Looptijd: September 2023 – augustus 2028

Veel vitale infrastructuur is afhankelijk van satellietnavigatiesystemen zoals het Amerikaanse GPS en het Europese Galileo. Deze systemen kennen echter beperkingen en kwetsbaarheden: de ontvangen radiosignalen zijn zwak, en de plaatsbepaling wordt onnauwkeurig wanneer de radiosignalen door gebouwen worden gereflecteerd of geblokkeerd. Toch zijn burgers, autoriteiten en onze infrastructuur afhankelijk van deze satellietnavigatiesystemen en is er geen backup-systeem. Het SuperGPS-2 project is een vervolg op het succesvolle NWO-project SuperGPS. In het SuperGPS project is een concept neergezet voor een alternatieve infrastructuur voor satellietnavigatiesystemen, gebaseerd op lokale, aardgebonden tijdzenders, waarmee plaatsbepaling met een nauwkeurigheid van 10 cm mogelijk wordt. Het vervolgproject zet in op een verdere ontwikkeling van de laatste schakel in deze infrastructuur, het radiosignaal waarmee de tijd wordt overgedragen van de lokale zender naar de ontvanger van de gebruiker.

VSL zal deelnemen aan de gebruikerscommissie en het onderzoek ondersteunen met input op het gebied van nauwkeurige tijdstransfer. De opgedane kennis zal VSL helpen in het verder vormgeven van haar strategie voor disseminatie van UTC(VSL).

Technische voortgang in 2024:

De start van het project werd een half jaar uitgesteld omdat de werving van promovendi aan de TU Delft vertraging opliep. Op 14 mei 2024 vond de kick-off bijeenkomst plaats en op 14 november was de eerste voortgangsbijeenkomst, beide op de TU Delft, waarbij VSL als lid van de gebruikerscommissie de bijeenkomsten bijwoonde. Tijdens de bijeenkomsten zijn de plannen en voorlopige resultaten gepresenteerd. In 2025 wordt een eerste demonstratie met draadloze tijdoverdracht verwacht. Vooralsnog is hiervoor geen concreet plan gemaakt.

4.5.2 Digitale metrologische tweelingen voor geavanceerde maakindustrie (ADAM)

Projectdoel: Het ondersteunen van geavanceerde productieprocessen met behulp van zogenaamde Digital Metrology Twins (D-MT's), waarbij VSL vooral zal werken aan een digitale representatie van tactiele metingen op de CMM.

Looptijd: September 2024 – augustus 2027

Advanced Manufacturing maakt nieuwe ontwerp- en productietechnieken mogelijk voor producten met complexe vrije-vormgeometrieën, waarbij een sterk toenemende vraag is naar snelle en contactloze metingen voor industriële kwaliteitscontrole met behulp van optische sensoren. De huidige simulatiemethoden om de meetonzekerheid te bepalen met behulp van Digital Metrology Twins (D-MT's) dekken deze ontwikkelingen nog niet. Met het oog op de digitale transformatie en ter

ondersteuning van duurzame innovatie in geavanceerde industriële toepassingen in heel Europa zal dit project zich richten op betrouwbare digitale modellen, geschikte parametrisatiemethoden, richtlijnen ontwikkelen voor herleidbare metingen van complexe vrije-vormgeometrieën en het gebruik van optische sensoren in coördinatenmetrologie. Er zullen wiskundige modellen van optische sensortechnologieën en vrije-vormige werkstukken (bijv. turbinebladen, medische implantaten, enz.) worden ontwikkeld rekening houdend met de relevante onzekerheidsbijdragen. Deze zullen bruikbaar worden gemaakt voor Digital Twins in de metrologie die meetprocessen, werktuigmachines en werkstukken in industriële toepassingen representeren.

VSL brengt haar expertise in dit project met betrekking tot herleidbare tactiele metingen middels coördinatenmeetmachines, de wiskundige modellering daarvan en een verbetering in de onzekerheidsevaluatie. VSL zal bijdragen aan de ontwikkeling van "softgauges", dat zijn datasets van virtuele standaarden die gebruikt kunnen worden voor het testen van digitale modellen. De belangrijkste bijdrage is de ontwikkeling van onzekerheidsberekeningen (eventueel uitgebreid naar een volledige virtuele CMM) voor kalibratiemethodes op de 3D-CMM van verschillende standaarden, zoals ringen, pennen en eindmaten. VSL zal dit demonstreren middels het uitvoeren van tactiele metingen en de toepassing van de ontwikkelde onzekerheidssimulaties.

Technische voortgang in 2024:

In samenwerking met de projectpartners is er een overzicht gemaakt van fysieke freeform standaarden die beschikbaar zijn voor het project. Tevens is er een lijst opgesteld met freeform features die nog niet in fysieke standaarden zijn gebruikt voor de ontwikkeling van een nieuwe freeform standaard.

Daarnaast is er literatuurstudie gedaan naar verschillende manieren van aanpak om tot een principe ontwerp van het VCMM-model te komen en welke methodes beschikbaar zijn voor de karakterisatie van de afwijkingen van de 3D-CMM van VSL.

Voor de karakterisatie van de 3D-CMM die begin 2025 zal plaats vinden zijn er afspraken gemaakt met een leverancier. Via dezelfde leverancier is een VCMM-softwarepakket aangeschaft, dat werkt met de zogenaamde PTB-kernel, zodat we een validatiemethode hebben voor de eigen ontwikkeling van de VCMM binnen het ADAM project.

4.5.3 Herleidbare Machine Vision (DI-Vision)

Projectdoel: Het waarborgen van de herleidbaarheid en betrouwbaarheid van Machine Vision Systems (MVS'en) die worden gebruikt in industriële toepassingen, waaronder voor producten op macroschaal en microschaal.

Looptijd: September 2024 – augustus 2027

MVS'en zijn van cruciaal belang voor veel hoogwaardige industrieën, waarin Europa wereldwijd concurrerend is, en voor de EU-doelstellingen op het gebied van digitale transformatie en van energietransitie. Daarom is verdere ontwikkeling nodig om:

- De herleidbaarheid van bestaande en toekomstige MVS'en in combinatie met andere meetapparatuur te bereiken;
- Digital twins van MVS'en te ontwikkelen op basis van data en fysieke aangedreven modellen;
- Robuuste matching- en analysealgoritmen te implementeren voor grote hoeveelheden opgeslagen ruwe data.

De ontwikkelde methodes in combinatie met onzekerheidsevaluatie zullen worden toegepast op industriële voorbeelden waarbij macro- en microstandaarden zorgen voor hogere nauwkeurigheid, productiviteit en meer flexibiliteit, evenals verbeterde veiligheid en kostenreductie.

VSL richt zich op twee type machine vision oplossingen voor respectievelijk (1) uitbreiding met optische hoge-resolutie camera op de 3D-CMM en (2) de optische camera op een HF-waferprobingstation te gebruiken voor advanced control en contact detectie.

De optische camera op de 3D-CMM zal ontwikkeld worden voor kalibraties van 2D-gridplates en optische referentiestandaarden voor microscopen. VSL richt zich op het ontwikkelen van de algoritmes voor beeldverwerking, borgen van de herleidbaarheid en opstellen van onzekerheidsbudgetten. Hierbij is ondersteuning van het vakgebied Data Science en Modelling. Tevens worden nieuwe methodes ontwikkeld die als basis kunnen dienen voor aanpassingen van bestaande standaarden voor vision systemen op coördinatenmeetsystemen.

De machine vision voor HF-waferprobing zal worden ontwikkeld voor het geautomatiseerde controleren en bepalen van de kwaliteit van het elektrische contact aan de hand van de achtergelaten afdruk. Het VSL probing systeem wordt gebruikt om een dataset van bovenaanzichtbeelden te verzamelen van probe-substraatcontactafdrukken. Hierbij worden Ground Signal Ground (GSG) probes, met pitch afstand van 150 μm , 100 μm , en 50 μm , gebruikt in combinatie met goud en aluminum substraten. Deze substraten worden vervolgens aangeleverend voor karakterisatie van de probevoetafdruk door een externe partner, in combinatie waarmee de dataset van bovenaanzichtbeelden wordt ingezet om algoritmes te ontwikkelen.

Technische voortgang in 2024:

Het software-algoritme voor het bepalen van coördinaten in een 2D-grid is gemoderniseerd en additionele onzekerheidsberekeningen zijn toegevoegd. Dit is de methode die zal worden toegepast voor de kalibratie van 2D-grid met het nieuwe vision-systeem voor op de 3D-CMM. De opties voor het integreren van het vision-systeem op de 3D-CMM zijn geëvalueerd en hardware is geïnventariseerd die nodig is voor de kalibratiemethodes van 2D-grid.

4.5.4 Betrouwbare virtuele experimenten en digital twins (ViDiT)

Projectdoel: Het ontwikkelen van richtlijnen voor de ontwikkeling en het gebruik van metrologisch verantwoorde Virtuele Experimenten (VE's) en Digitale Tweelingen (DT's) en toepassing daarvan op de VSL CMM.

Looptijd: Mei 2023 – april 2026

Virtuele experimenten (VE) en digital twins (DT) stellen technologieën in staat om Europees strategisch beleid te realiseren. Dit beleid is gericht op duurzaamheid en digitalisatie binnen het raamwerk van Industry 4.0 en de Europese Green Deal. Metrologische betrouwbaarheid van deze digitale metingen is fundamenteel wanneer deze gebruikt worden voor bijvoorbeeld kwaliteitscontrole of toepassingen met juridische gevolgen. Dit project zal GUM-conforme onzekerheidsmethodes ontwikkelen. Ook worden validatieprocedures ontwikkeld die de betrouwbaarheid van VEs en DTs in metrologie garanderen. De toepasbaarheid van de ontwikkelde methodes zullen gedemonstreerd worden in twaalf casestudies in industriële metrologische toepassingen, waaronder coördinatenmeetmachines en flowmetingen.

Binnen dit project richt VSL zich op:

- Het ontwikkelen van methodes om Virtuele Experimenten te valideren en om GUM-conforme onzekerheden te berekenen.
- Toepassen van bovenstaande technieken op een nieuw te ontwikkelen virtuele CMM voor VSL's relatief recent aangeschafte nieuwe CMM.
- Begrijpen hoe de aanwezigheid van (enkele of dubbele) ellebogen stroomopwaarts van een stroommeter de meterstanden beïnvloedt.

Technische voortgang in 2024:

Het benchmark-scenario voor de coördinaten meetmachine (CMM) is afgerond. Dit benchmark-scenario is een versimpelde maar representatieve virtuele representatie van de CMM, waarin het effect van foutbronnen wordt vertaald naar de gemeten coördinaten en daarmee de geschatte eigenschappen van het gemeten object. In het benchmark-scenario worden de straal en rondheid van een cirkel geschat. Verder zijn verschillende methodes geïmplementeerd om de onzekerheid te bepalen van de geschatte straal en rondheid, met behulp van de virtuele CMM. De volgende methodes zijn

geïmplementeerd: variantie voortplanting, voortplanting van verdelingen op verschillende manieren en Bayesiaanse methodes. Met deze implementatie kunnen de verschillende methodes om onzekerheid te evalueren vergeleken worden. Het benchmark scenario is gedocumenteerd in een technisch rapport en voor de code is een HTML-pagina opgezet met beschrijving van de meest relevante functionaliteiten. Het benchmark-scenario inclusief documentatie is gedeeld met partners ter review. De resultaten zijn in augustus gepresenteerd op het IMEKO World Congress in Hamburg.

Verder is in samenwerking met PTB gekeken naar methodes die in overeenstemming zijn met de “Guide to the expression of uncertainty in measurements” (GUM). Naar aanleiding hiervan zijn er papers ingediend bij Metrologia en het IMEKO World Congress in Hamburg.

Tot slot is er een start gemaakt met het ontwikkelen van de volledige virtuele CMM, op basis van de versimpelde virtuele CMM die ontwikkeld is in het benchmark-scenario. Ook is er een start gemaakt met de validatie van de virtuele CMM: een lijst met de belangrijkste onzekerheidsbronnen van de (virtuele) CMM is opgesteld en interne en externe discussies zijn gehouden over de validatiemethodes die in 2025 uitgevoerd gaan worden.

Publicaties in 2024:

- M. Marschall, F. Hughes, G. Wübbeler, G. Kok, M. v. Dijk, C. Elster, *Using a multivariate virtual experiment for uncertainty evaluation with unknown variance*, submitted to Metrologia
- De onderstaande presentaties op het IMEKO World Congress zullen naar verwachting begin 2025 gepubliceerd worden in het tijdschrift Measurement: Sensors.

Presentaties in 2024:

- Marcel van Dijk, Gertjan Kok, *Comparison of uncertainty evaluation methods for virtual experiments with an application to a virtual CMM*, accepted for presentation at XXIV IMEKO World Congress, Hamburg, August 2024 [<https://www.imeko2024.org/home>]
- F. Hughes, M. Marschall, G. Wübbeler, G. Kok, M. v. Dijk, C. Elster, *JCGM 101-compliant uncertainty evaluation using virtual experiments*, under review for presentation at XXIV IMEKO World Congress, Hamburg, August 2024 [<https://www.imeko2024.org/home>]

4.5.5 Fundamentele eigenschappen van sensor netwerken (FunSNM)

Projectdoel: Het ontwikkelen van de noodzakelijke fundamentele principes ten behoeve van een metrologisch verantwoord gebruik van sensornetwerken.

Looptijd: September 2023 – augustus 2026

Sensornetwerken worden in steeds grotere aantallen toegepast. De correctheid, onzekerheid en herleidbaarheid van metingen die uitgevoerd worden middels een sensornetwerk worden steeds belangrijker. Belangrijke voorbeelden van sensornetwerken met gedistribueerde metingen zijn het elektriciteitsnetwerk en netwerken voor het meten van de luchtkwaliteit. In het laatste geval bestaan er nationale netwerken met een relatief beperkt aantal meetpunten met hoogwaardige referentie-apparatuur. Tevens zijn er vele initiatieven en experimenten met low-cost sensornetwerken. Het is nog niet helemaal bekend hoe de kalibratie en kwaliteitsbewaking van dergelijke sensoren optimaal vormgegeven kan worden, en ook zijn er open vragen m.b.t. de onzekerheidsberekening voor gecorreleerde sensoren.

VSL zal in dit project algemeen toepasbare methodes ontwikkelen voor onzekerheidsrekening met gecorreleerde sensoren, en voor de kalibratie van sensoren. Deze methodes zullen concreet toegepast worden op sensornetwerken van luchtkwaliteitssensoren.

Technische voortgang in 2024:

Er is een rapport geschreven met betrekking tot verschillende soorten van correlatie die kunnen optreden in sensornetwerken, waarbij met name een onderscheid is gemaakt tussen de correlatie in een multidimensionale meetgrootte (bijv. correlatie van de NO₂-concentratie op naburige locaties en

tijdstippen) en correlaties in de meetfouten van sensoren (dezelfde sensor op verschillende tijdstippen, of tussen verschillende sensoren van hetzelfde type). Deze correlatiestructuur kan gemodelleerd worden m.b.v. Gaussische processen, waarbij de gebruikte kernel uit twee delen bestaat: een deel dat de correlatie van de meetfouten van de sensoren modelleert, en een deel dat de correlatie van de meetgrootte zelf modelleert. Er is beschreven hoe deze correlaties op een correcte manier verwerkt kunnen worden bij het interpoleren en middelen van sensordata. Dit idee is vervolgens toegepast op een openbare dataset uit het QUANT-project [<https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/ae1df3ef736f4248927984b7aa079d2e>].

De resultaten zijn in augustus gepresenteerd op het IMEKO World Congress in Hamburg en zullen begin 2025 worden gepubliceerd in wetenschappelijk tijdschriften.

Publicaties in 2024:

- Voor elk van de onderstaande drie presentaties wordt een publicatie verwacht in het tijdschrift *Measurement: Sensors* begin 2025.

Presentaties in 2024:

- Gertjan Kok, Marcel van Dijk, Peter Harris, Anupam Vedurmudi, *Modelling and determining correlations in sensor networks*, accepted for presentation at XXIV IMEKO World Congress, Hamburg, August 2024 [<https://www.imeko2024.org/home>]
- Anupam Vedurmudi, Gertjan Kok, et al., *Automation in sensor network metrology: an overview of methods and their implementations*, accepted for presentation at XXIV IMEKO World Congress, Hamburg, August 2024 [<https://www.imeko2024.org/home>]
- Shahin Tabandeh, Marcel van Dijk, Gertjan Kok, et al., *Sensor network metrology: current state and future directions*, accepted for presentation at XXIV IMEKO World Congress, Hamburg, August 2024 [<https://www.imeko2024.org/home>]

4.5.6 Verbetering van microfluidic sensing m.b.v. kunstmatige intelligentie (MOSAIC)

Projectdoel: Deelname aan de gebruikerscommissie van het NWO project “Enhancement of Microfluidic Sensing with deep symbolic Artificial Intelligence” (MOSAIC), geleid door de Universiteit Twente (UT), en interne kennisopbouw bij VSL over dit onderwerp.

Looptijd: Januari 2024 – december 2027

Het nauwkeurig meten van debiet, druk, compositie en andere fysische grootheden is cruciaal in vele toepassingen. Het is nu mogelijk verschillende type sensoren, bijv. debiet, druk en dichtheid, op één chip te integreren. Door het analyseren van de ruwe meetsignalen en het gebruik van AI kunnen mogelijk ook andere grootheden gemeten worden, zoals bijv. de viscositeit en de compositie van het gas of de vloeistof. Ook kunnen debiet en druk nauwkeuriger gemeten worden d.m.v. AI-gebaseerde compensatie van niet-ideale effecten.

VSL zal input geven op het onderzoek vanuit metrologisch perspectief. VSL zal hiervoor plaatsnemen in de gebruikerscommissie. Tevens zal VSL de modellen narekenen en gevoeligheidsanalyses uitvoeren op het model op basis van de beschikbare data en modellen. Ten slotte zal VSL een stappenplan maken om dergelijke systemen volledig te valideren en metrologisch herleidbaar te maken.

Door deze kennis zal VSL in de toekomst beter in staat zijn fabrikanten advies te geven m.b.t. het gebruik van AI in meetapparatuur. Ook zal dit inzichten opleveren m.b.t. de onzekerheid en validatie van dergelijke AI-gebaseerde systemen.

Technische voortgang in 2024:

De kick-off meeting is volgens plan bijgewoond op de Universiteit Twente (UT) in maart 2024 en een tweede meeting heeft bij de firma Bronkhorst plaatsgevonden in september 2024. Aangezien er vertraging heeft plaatsgevonden bij de selectie van geschikte promovendi, zal de voortgang van dit project naar verwachting enige vertraging oplopen in de toekomst. De UT heeft desalniettemin relevante

literatuur gedeeld met de gebruikerscommissie. Deze literatuur is bij VSL bestudeerd t.b.v. de interne kennisopbouw bij VSL.

4.6 Overige projecten

4.6.1 Concept voor een echte 8-digit digitizer (True8Digit)

Projectdoel: Het opbouwen van ervaring met nieuwe analoog-digitaalozetters die we kunnen toepassen in onze meetopstellingen en het leveren van een bijdrage aan het ontwerpen van een lage-ruisvoeding en front-end voor een concept 8-digit digitizer.

Looptijd: Juni 2023 – mei 2026

Digitizers, sampling technieken en timing zijn kritieke onderdelen in veel van de VSL opstellingen. De meest gebruikte digitizer op dit moment is de HP3458A, een multimeter die al meer dan 30 jaar niet is overtroffen qua nauwkeurigheid en niet meer beschikbaar is. Dit project is een voorstudie voor het bouwen van een digitizer die de specificaties van de HP3458A zou moeten kunnen evenaren. We bouwen voort op de resultaten die behaald zijn bij de distributed digitizer ontwikkeld in het EMPIR project FutureGrid II en breiden deze uit met de kennis opgedaan in het huidige project. Aangezien het een project is in de Research Potential call is een belangrijke component ook het delen van kennis en samenwerken met kleinere meetinstituten waar kennis van dit soort apparatuur nog niet zo ver ontwikkeld is.

Dit project richt zich op de ontwikkeling van een digitizer op basis van de modernste analoog-digitaalozetters (ADC's), die werkt van gelijkstroom (DC) tot 100 kHz, en voldoet aan de eisen voor lineariteit, ruis en algehele nauwkeurigheid van meettoepassingen op hoog niveau waaraan niet kan worden voldaan met de momenteel beschikbare digitizers. In dit project zal onderzoek worden gedaan naar de belangrijkste technieken en technologieën die nodig zijn ter ondersteuning van een vervolgproject op grote schaal. Een belangrijk doel is het bieden van mogelijkheden voor het opbouwen van onderzoekscapaciteit voor het ontwikkelen van NMI's/DI's op het gebied van het ontwerp en de karakterisering van elektronische meetapparatuur die nodig is voor een breed scala aan interdisciplinaire metrologische uitdagingen, zoals ultramoderne DC-metingen en geavanceerde digitale bemonsteringstechnieken. Hierdoor kunnen deze NMI's deelnemen aan toekomstige grootschalige projecten.

Binnen dit project zal VSL zich richten op het design van een nieuwe front-end structuur voor digitizers en een voeding met een extreem laag ruisniveau en extreem lage lek. Een ander belangrijk onderdeel is de verspreiding van kennis naar ontwikkelende NMI's over het ontwerp en de karakterisering van een dergelijke digitizers.

Technische voortgang in 2024:

Begin 2024 zijn digitizers aangeschaft en gekarakteriseerd zodat deze te gebruiken zijn om andere onderdelen van een analoog-digitaalozetter mee te testen. Daarnaast zijn ook Zenerreferenties aangeschaft als referentie voor de digitizers. In het project wordt er ook gewerkt aan een lage-ruis- en lage-lekvoeding. VSL heeft voor een van de geselecteerde voedingen de belangrijkste eigenschappen bepaald. Hiervoor is een speciale DC-DC converter gebruikt met hoge isolatiewaarden. De lekstroom kwam overeen met de eisen en is voldoende voor het projectdoel. Wel zal de ruis verder moeten worden onderdrukt door de implementatie van een ultra-low-noise regelcircuit. In de planning zit ook het synchroniseren van twee digitizers door middel van White Rabbit. Hier zal in een later stadium aan gewerkt worden.

4.6.2 Verplaatsbare optische klokken (TOCK)

Projectdoel: Het bijdragen aan de ontwikkeling van nieuwe verplaatsbare optische klokken voor toekomstige key comparisons en de validatie ervan en het opbouwen van kennis en ervaring met optische klokken.

Looptijd: Juni 2023 – mei 2026

Dit project is gericht op de ontwikkeling van een verplaatsbare optische klok die de toekomstige reisstandaard zou kunnen zijn voor internationale vergelijkingen van tijdschalen die gebaseerd zijn op optische klokken. Dit is nodig om de haalbaarheid van de optische klok aan te tonen voor toekomstige herdefinitie van de seconde zoals beschreven in de CIPM CCTF-roadmap.

In dit project zullen commercieel niet beschikbare componenten van verplaatsbare optische kloksystemen worden ontwikkeld en op basis daarvan zullen verplaatsbare optische klokken met een korte-termijn-stabiliteit van minder dan $5 \cdot 10^{-15}/\tau$ worden ontwikkeld en gedemonstreerd. De prestaties van de nieuw ontwikkelde mobiele optische klokken zullen worden geëvalueerd en gedemonstreerd, om ervoor te zorgen dat de optische klok binnen 5 dagen na transport kan werken.

VSL is de werkpakketleider van WP5, werkend aan de brede acceptatie en ingebruikname van de technologie die in het project wordt ontwikkeld. In Nederland zal gewerkt worden naar de opname van een transporteerbare optische klok in de realisatie van UTC(VSL) en als referentie in het Quantum Delta Netherlands (QD NL) ultracold quantum sensing testbed. Daarnaast zal VSL het werk van QD NL ondersteunen door via een glasvezelinfrastructuur nauwkeurige en traceerbare microgolftijd- en frequentiesignalen beschikbaar te stellen. Tevens gaat VSL de UvA ondersteunen bij de eerste evaluatie van de frequentie van compacte optische klokken in vergelijking met microgolfklokken.

Concreet zal worden gewerkt aan:

- Realisatie van een White Rabbit verbinding tussen Delft en Amsterdam zodat bij de UvA een nauwkeurig frequentiesignaal ter beschikking is voor een eerste evaluatie van de transportable optische klok.
- Bijdrage aan de meetopstelling om de optische frequentie te vergelijken met de 10 MHz referentiefrequentie die via de White Rabbit verbinding in Amsterdam komt.
- Opdoen van kennis en ervaring op het gebied van optische klokken en optische frequentiekammen.

Er wordt een hechte samenwerking gevormd tussen VSL en UvA. In deze samenwerking krijgt UvA de beschikking over een nauwkeurig frequentiesignaal dat herleidbaar is naar UTC(VSL). De optische klok die wordt gebouwd bij de UvA krijgt een rol in de realisatie van UTC(VSL), waarmee uiteindelijke de nauwkeurigheid en stabiliteit van UTC(VSL) naar schatting een factor 10 beter wordt.

In de samenwerking met UvA brengt VSL het kennisniveau op het gebied van frequentiekammen op het juiste niveau dat nodig is om deze in te zetten voor golflengtekalibraties bij Lengte en Optica en voor de koppeling tussen de optische klok en de microgolf klok bij Tijd en Frequentie.

Noot: Dit project heeft een nauwe koppeling met het ontwikkelproject “Aanschaf en in bedrijfsname van nieuwe frequentiekam” in 2024 onder de technologie Lengte. De intentie is om binnen dit multidisciplinaire ontwikkelproject een frequentiekam aan te schaffen die gedeeld wordt tussen de technologieën Lengte, Optica en Tijd en Frequentie.

Technische voortgang in 2024:

In samenwerking met SURF en OPNT is een glasvezelverbinding gerealiseerd tussen VSL en de Universiteit van Amsterdam (UvA), waarmee de frequentie van UTC(VSL) nauwkeurig naar het laboratorium van de UvA kan worden overgebracht. VSL heeft de UvA ondersteund met de installatie van de White Rabbit apparatuur die hiervoor nodig is. Sinds juni is de White Rabbit verbinding operationeel waardoor het UTC(VSL) signaal direct beschikbaar is voor het onderzoekswerk bij de UvA.

Presentaties in 2024:

- Presentatie in de EURAMET TC-TF vergadering op 16/17 april in Parijs.

4.6.3 Fundamentele fysica met koude moleculen (COMOMET)

Projectdoel: Het bieden van metrologische ondersteuning voor onderzoek aan koude moleculen, waarmee bijvoorbeeld natuurconstanten beter kunnen worden vastgesteld en waarmee fundamentele fysische wetten getoetst kunnen worden die de basis vormen van metrologisch principes.

Looptijd: Juni 2024 – mei 2027

De VU Amsterdam doet onderzoek aan koude moleculen, waarmee bijvoorbeeld natuurconstanten beter kunnen worden vastgesteld en waarmee fundamentele fysische wetten getoetst kunnen worden die de basis vormen van metrologisch principes. Onderzoek aan koude moleculen is onder andere gericht op verbeterde vaststelling van fundamentele constanten zoals de proton-electron massaverhouding, β , het toetsen van fundamentele fysische wetten en de ontwikkeling van frequentiestandaarden in het infraroodgebied.

Binnen dit project richt VSL zich op het beschikbaar stellen van een nauwkeurig, herleidbaar frequentiesignaal dat als referentie dient voor spectroscopie aan koude moleculen. Ook coördineert VSL de vorming van een strategie voor een voortdurende verbinding tussen wetenschappelijke instituten die onderzoek doen aan koude moleculen en metrologische instituten.

Technische voortgang in 2024:

Het project is op 1 juni van start gegaan. De activiteiten van VSL liggen voor op schema. De WR-verbinding tussen VSL en VU is al operationeel.

4.6.4 Sensoren voor trillingsisolatie in de Einstein Telescoop (SENVIDET)

Projectdoel: Het ondersteunen bij de validatie en kalibratie van de ontwikkelde opto-mechanische trillingsensoren voor de Einstein Telescoop.

Looptijd: Juli 2024 – Juni 2027

In project SENVIDET wordt een bijdrage geleverd aan de ontwikkeling van Einstein Telescope door innovatie op het gebied van sensoren voor vibratie-isolatie. De uitdagingen die hierbij aan bod komen hebben betrekking op seismische signaalverstoring door kanteling van de optiek van de zwaartekrachtgolfttelescoop en eisen aan precieze en nauwkeurige relatieve afstandsmeting. Er wordt door vier MKB-deelnemers, twee kennisinstellingen en een hightech-systeemintegrator een plan voorgesteld voor de ontwikkeling van een nieuwe generatie inertieële rotatiesensoren en interferometrische afstandssensoren, die een uitkomst kunnen bieden voor de genoemde uitdagingen. Uitvoering van dit plan biedt een kans voor het bedrijfsleven om input te leveren aan de ontwikkeling van Einstein Telescope en tegelijkertijd is dit een mogelijkheid tot valorisatie door de kennis van Nikhef over te dragen naar hightech-bedrijven.

De belangrijkste taak voor VSL binnen het project is ondersteunen en het ter beschikking stellen van onze ervaring en faciliteiten op het gebied van nauwkeurige verplaatsings- en vibratie-metingen. De verschillende sensoren die in het project worden ontwikkeld door de partners worden uiteindelijk allemaal op systeemniveau getest met behulp van, onder andere, opstellingen van VSL. Daarnaast draagt VSL ook bij aan het opstellen van de specificaties en technische eisen van enkele sensoren. De verschillende optische sensoren die binnen het project zullen worden ontwikkeld zijn onderverdeeld in (fiber) optische inertieële sensoren en interferometrische sensoren.

Uiteindelijk zullen alle validatiemetingen en bevindingen worden gerapporteerd in een eindrapport op systeemniveau samen met andere partners.

Technische voortgang in 2024:

Met de consortiumpartners is er een workshop gehouden over de specificaties van de SENVIDET-sensoren voor de Einstein Telescope. Met individuele consortiumpartners is in meer detail gesproken over uitvoering van de geplande karakterisatie van een of meerdere sensoren met behulp van de faciliteiten bij VSL.

4.6.5 Radiometrie en fotometrie na de uitfasering van gloeilampen (NEWSTAND)

Projectdoel: Het ontwikkelen van nieuwe kalibratiestandaarden en -methoden voor radiometrie en fotometrie voor na de uitfasering van gloeilampen.

Looptijd: Juni 2023 – mei 2026

Dit project zal zich richten op de herleidbare metingen van spectrale straling. Daarnaast zal de benodigde metrologische infrastructuur worden ontwikkeld die nodig is na de uitfasering van de gloeilampen die momenteel worden gebruikt als werkstandaarden.

Lichtbronnen zijn alomtegenwoordig in de moderne tijd, en nauwkeurig meten van de optische straling is van cruciaal belang. Optische metingen wordt gebruikt als parameter om industriële processen, essentiële klimaatvariabelen, verlichting, gezondheidszorgtoepassingen, biologische veiligheid, en dergelijke te bewaken. De kalibraties van meetinstrumenten worden al tientallen jaren gedaan met behulp van op gloeilamp gebaseerde spectrale irradiantiestandaarden. De beschikbaarheid hiervan neemt echter af als gevolg van een geleidelijke stopzetting van de gloeilampenproductie. Daarnaast zijn de nieuw ontwikkelde lampen, op basis van solid-state-lighting (SSL)-technologie, beperkt tot zichtbare golflengten. Er zijn daarom alternatieve werkstandaarden vereist. Adequate en betaalbare vervangende werkstandaarden en methoden moeten ontwikkeld worden voor een op-detectoren-gebaseerde overdracht van de eenheid, om belanghebbenden en eindgebruikers te ondersteunen.

VSL zal nieuwe kalibratiemethoden ontwikkelen voor array spectroradiometer. De methoden worden gebaseerd op spectraal breedbandig en spectraal verstelbare standaardbronnen, voor het ultraviolet - zichtbaar-nabij-infrarood (UV-VIS-NIR). Deze standaardbronnen zijn de beoogde vervanging voor de huidige op gloeilamp gebaseerde standaarden, waarvan de schikbaarheid snel afneemt door de uitfasering van gloeilampen.

Technische voortgang in 2024:

De ontwikkeling van de lasergestuurde plasmalichtbron (LDLS) in WP1 voor het gebruik van een breedbandige transferstandaard als lichtbron is begonnen met een literatuurreview. Voor deze ontwikkeling is een lichtbron in het UV-bereik gekoppeld met een parabolische spiegel als collimator. Het voorgaand werk liet zien dat de setup problemen zou hebben met uniformiteit en daarom hebben VSL en PTB een andere, lens-gebaseerde, collimator voorgesteld. Het design hiervoor is gemaakt en de opstelling opgebouwd in het lab. Problemen met de stabiliteit van de lichtoutput en uniformiteit blijven en worden aangepakt met input van een andere projectpartner. Het updaten van de op een monochromator gebaseerde meetfaciliteit is nog niet gestart. VSL is eind 2024 begonnen met een voorlopige uitlijning van de LDLS met behulp van dubbele parabolische optieken bij de monochromatorfaciliteit. Enkele voorlopige waarnemingen, uitgevoerd met een arrayspectroradiometer, zijn gepresenteerd aan het consortium tijdens de M18-bijeenkomst.

Na enige vertraging bij de partners voor WP2 hebben nu de meeste een stakeholder gevonden die, middels een Letter of Agreement zijn toegetreden. Deze stakeholders zullen array-spectroradiometers leveren voor de karakterisatie en kalibratie hiervan bij de partner-labs. VSL heeft hiervoor twee potentiële leveranciers uit Nederland benaderd. VSL heeft uiteindelijk een samenwerking op kunnen zetten met een van hen die als Nederlandse stakeholder nu is toegevoegd aan NEWSTAND. Er is een kleine kick-off meeting geweest bij VSL en de samenwerking was officieel van start gegaan. Van de twee array-spectroradiometers die zijn geleverd en speciaal voor het project zijn ontworpen zijn de radiometrische karakterisaties gedeeltelijk voltooid, zoals gepresenteerd tijdens de M18- bijeenkomst.

Presentaties in 2024:

- Presentatie van NEWSTAND project bij CIE Nederland op 12 juni 2024

5 Lijst met afkortingen

1PPS	1 Pulse Per Second
AbT	Assembly by Torque
AC	Alternating Current
ACR	Absolute Cryogene Radiometer
ADC	Analog-Digital Converter
AFM	Atomic Force Microscopy
AI	Artificial Intelligence
AM	Additive Manufacturing
ANVS	Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming
API	Application Programming Interface
AS	Application Services
AV	Alternating Voltage
BHV	Bedrijfs hulpverlening
BIO	Baseline Informatiebeveiliging Overheid
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures
BTEX	Benzeen, toluen, ethylbenzeen en xyleen
CAPA	Corrective and Preventive Action
CAPS	Cavity Attenuated Phase Shift
CCC	Cryogenic Current Comparator
CCEM	Consultative Committee for Electricity and Magnetism
CCL	Consultative Committee for Length
CCPR	Consultative Committee for Photometry and Radiometry
CCQM	Consultative Committee for Amount of Substance
CCT	Consultative Committee for Thermometry
CCTF	Consultative Committee for Time and Frequency
CCUS	Carbon Capture, Utilisation and Storage
CD	Critical Dimension
CEN	European Committee for Standardization
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization
CFD	Computational Fluid Dynamics
CFS	Coherente Fourier Scatterometrie
CGM	Calibrated Gas Mixture
CIE	International Commission on Illumination
CIGRE	International Council on Large Electric Systems
CIPM	Comité International des Poids et Mesures
CIS	Cilinder Inventarisatie Systeem
CMC	Calibration and Measurement Capability
CMH	Chilled Mirror Hygrometer
CMM	Coördinaten Meetmachine
COPA	Composite OPERational Amplifier
CRM	Certified Reference Material
CT	1. Continuïteitstoelag; 2. Current Transformer
CTE	Coefficient of Thermal Expansion
DC	Direct Current
DCPQ	DC Power Quality
DMM	Digitale Multimeter
D-MT	Digital Metrology Twin
DOF	Degrees of Freedom
DOK	Directe Orderkosten
DPI	Digital Pressure Indicator
DPT	Digitale Piezo Translator
DSM	Data Science en Modelling
DT	Digital Twin
DTS	Dynamische Temperatuur Standaard
DV	Direct Voltage
ECFM	European Center for Flow Measurement
EEA	European Environment Agency
EFTF	European Frequency and Time Forum
EIS	Electrical Impedance Spectroscopy
EM	Electromagnetisch
EMN	European Metrology Network
EMPIR	European Metrology Programme for Innovation and Research
EMRP	European Metrology Research Programme
EOL	End Of Life

EPM	European Partnership on Metrology
ERM	Emissie Referentie Materialen
ETS	Emissions Trading System
EURAMET	European Association of National Metrology Institutes
EuReGa	European References for Gas
EV	Electric Vehicle
EVCS	Electric Vehicle Charging System
EZ	Ministerie van Economische Zaken
FAIR	Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable
FENELAB	Federatie Nederlandse Laboratoria
FID	Flame Ionisation Detector
FLASH-RT	FLASH-radiotherapie
FOCS	Fibre Optical Current Sensors
FP	Fixed Point
FPGA	Field Programmable Gate Array
FTIR	Fourier Transform Infrared spectroscopy
GAWG	Gas Analysis Working Group
GC	Gas Chromatograaf
GC-MS	Gas Chromatograaf met Massa Spectroscopie
GC-SCD	Gas Chromatograaf met Sulfur Chemiluminescence Detector
GI	Grote Installatie
GNSS	Global Navigation Satellite System
GOPP	Gas Oil Piston Prover
GPIB	General Purpose Interface Bus
GPG	Good Practice Guide
GPS	Global Positioning System
GSG	Ground Signal Ground
GSS	Grote Stralings Standaard
GUI	Graphical User Interface
GUM	Guide to the expression of Uncertainty in Measurement
H2-ICE	Hydrogen Internal Combustion Engine vehicles.
HD HRS	Heavy Duty Hydrogen Refilling Station
HDR	High Dose Rate
HENG	Hydrogen Enriched Natural Gas
HF	Hoogfrequent
HPC	High Performance Computing
HPDG	Hoge Druk Dauwpunt Generator
HRS	Hydrogen Refilling Station
HTML	Hyper Text Markup Language
HT-SPRT	High-Temperature Standard Platinum Resistance Thermometer
HV	High Voltage
HVCB	High Voltage Capacity Bridge
HVDC	High Voltage Direct Current
HyQS	Hydrogen Quality Standard
IAEA	International Atomic Energy Agency
IC	Integrated Circuit
IEC	International Electrotechnical Commission
IKR	Interne Kalibratie Registratie
IO	Ioniserende straling
IRPP	Instromet Rotary Piston Prover
ISO	International Organization for Standardization
ISS	Impedance Standard Substrate
ITS-90	International Temperature Scale of 1990
IVD	Inductive Voltage Divider
JAVS	Josephson Array Voltage Standard
JAWS	Josephson Arbitrary Waveform Synthesiser
JCGM	Joint Committee for Guides in Metrology
KCDB	Key Comparison Database
KCRV	Key Comparison Reference Value
KDT JU	Key Digital Technologies Joint Undertaking
KET	Key Enabling Technology
LBG	Liquefied Biogas
LCR	Inductie, capaciteit en weerstand
LD HRS	Light Duty Hydrogen Refilling Station
LDLS	Laser Driven Light Source
LDR	Low Dose Rate
LF	Laagfrequent

LFI	Low Flow Installatie
LI	Lightning Impulse
LL	Load Loss
LNG	Liquefied Natural Gas
LTE	Long Term Evolution
MDV	Massa, Druk en Vacuüm
MFC	Mass Flow Controller
MFK	Multi Functie Kalibratie
MID	Measuring Instruments Directive
ML	Machine Learning
MLS	Multi Layer Substrate
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
MRA	Mutual Recognition Arrangement
MRI	Magnetic Resonance Imaging
MSB	Magnetic Suspension Balance
MSL	Mid-scale standard for LNG
MVS	Machine Vision System
NA	Numerieke Apertuur
NC	Non-conformity
NEN	Nederlands Normalisatie Instituut
NMI	Nationaal Metrologie Instituut
NTP	Network Time Protocol
NUC	Netherlands URSI Committee
NWIP	New Work Item Proposal
OEM	Original Equipment Manufacturer
OIML	International Organization for Legal Metrology
OPO-CRDS	Cavity Ringdown Spectroscopy with Optical Parametric Oscillator
P&ID	Piping & Instrumentation Design
PCB	Printed Circuit Board
PD	Partial Discharge
PEM	Polymer Electrolyte Membrane
PFAS	Per- en polyfluoralkylstoffen
PKL	Platform Kwaliteit Lucht
PMJTC	Primaire Planar Multi-Junction Thermal Converter
PPV	Practical Peak Value
PQ	Power Quality
PRM	Primary Reference Material
PSL	Primary Standard for LNG
PSM	Primair Standaard Mengsel
PstLM	Short term Perceptability for Light Modulation
PT	Proficiency Test(ing)
PTP	Precision Time Protocol
PVTT	Pressure, Volume, Temperature, and Time
QAT	Quality Assurance Tools
QHE	Quantum Hall Effect
QHR	Quantum Hall Resistance
RAKR	Reference Air Kerma Rate
RF	Radio Frequency
RH	Relative Humidity
RMC	Robot Mass Comparator
RMG	Researcher Mobility Grant
RNT	Radio Nuclide Therapie
RvA	Raad voor Accreditatie
RvD	Raad van Deskundigen
SA	Strategic Agenda
SAMU	Stand Alone Merging Unit
SDR	Software Defined Radio
SIRF	Spectral IRradiance Facility
SLM	Spatial Light Modulator
SOC	State of Charge
SOH	State of Health
SPECT	Single-Photon Emission Computed Tomography
SPM	Scanning Probe Microscopy
SPRT	Standard Platinum Resistance Thermometer
SRA	Strategic Research Agenda
SSL	Solid State Lighting
SV	Sampled Value

SVM	Stroboscopic Visibility Metric
SWA	Side Wall Angle
TC-EM	Technical Committee for Electricity and Magnetism
TC-GM	Technische Commissie voor Geometrische Meettechniek
TC-IM	Technical Committee for Interdisciplinary Metrology
TC-L	Technical Committee for Length
TC-MC	Technical Committee for Mass in Chemistry
TCP	Transmission Control Protocol
TC-PR	Technical Committee for Photometry and Radiometry
TC-Q	Technical Committee for Quality
TC-T	Technical Committee for Thermometry
TC-TF	Technical Committee for Time and Frequency
TC-TV	Technische Commissie Temperatuur en Vocht
TDLS	Tunable Diode Laser Spectroscopy
TDLAS	Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy
TG	Task Group
TIC	Time Interval counter
TLM	Temporal Light Modulation
TraSys	Traceability System
TSB	Time Service Bulletin
TVB	Taken, Verantwoordelijkheden en Bevoegdheden
TWSTFT	Tweeweg Satelliet Tijd- en Frequentietransfer
URSI	Union Radio-Scientifique Internationale
UTC	Universal Time Coordinated
VCMM	Virtuele Coördinaten Meetmachine
VCR	Vacuum Coupling Radiation
VDI	Verdringingsinstallatie
VE	Virtueel Experiment
VNA	Vector Network Analyzer
VOC	Volatile Organic Compound
VT	Voltage Transformer
VWS	Ministerie van Volksgezondheid, Welzijn en Sport
WG TAI	Working Group on the International Atomic Timescale
WG TWSTFT	Working Group on Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer
WMO	Wereld Meteorologische Organisatie
WP	Werkpakket
WR	White Rabbit
WTP	Water Tripel Punt
XMM	X-ray Multi Meter
ZFCT	Zero Flux Current Transformer
ZSS	Zachte Stralings Standaard