



National
Metrology
Institute

Programma voor de Nationale Meetstandaarden

Publieke verantwoording 2023

SBO (EZK verplichtingennr. 1300033591)

Researchsubsidie (EZK verplichtingennr. 1300033996)

Inhoudsopgave

1	Woord van de directeur	5
2	Inleiding	6
3	SBO	7
3.1	Chemie	7
3.2	Massa en gerelateerde grootheden	7
3.3	Thermometrie	8
3.4	Elektriciteit	8
3.5	Tijd en Frequentie	9
3.6	Lengte	9
3.7	Optica	10
3.8	Volumetrie	10
3.9	Ioniserende straling	11
3.10	Metrologische infrastructuur	11
4	Research	13
4.1	Energie en Klimaat	13
4.1.1	Metrologie voor het achtergrondniveau van CO ₂ in lucht	13
4.1.2	European Metrology Network Energy Gases (Energy Gases)	13
4.1.3	Metrologie voor isotoopanalyses (STELLAR)	14
4.1.4	Metrologie voor het koolstofvrij maken van het aardgasnetwerk (Decarb)	15
4.1.5	HyScaling	15
4.1.6	SI-herleidbare validatie van methodes voor biomethaan conformity assessment (BiometCAP)	16
4.1.7	Green Transport Delta – Waterstof	16
4.1.8	Waterstofbemonstering voor zwaar transport (MetHyTrucks)	16
4.1.9	Ondersteuning voor een Europees Metrologie Netwerk op het gebied van Slimme Elektriciteits-netwerken (SEG-Net)	17
4.1.10	Metrologie voor energietransport (FutureEnergy)	17
4.1.11	Meettransformatoren voor power quality metingen (IT4PQ)	18
4.1.12	Ondersteuning voor een Europees Metrologie Netwerk op het gebied van Schone Energie (CleanEnergy)	19
4.1.13	Metrologie voor DC-netten (DC grids)	19
4.1.14	Metrologie voor digitale instrumenten in onderstations (Digital-IT)	20
4.1.15	Efficiëntiemetingen aan vermogenselektronica (PowerizeD)	20
4.1.16	Karakterisatie van middenspanningstransformatoren tot 150 kHz (ADMIT)	21
4.1.17	Metrologie voor energie-efficiëntie in DC transportsystemen (e-TRENY)	21
4.1.18	Metrologie voor remote sensing van optische eigenschappen van aerosolen (MAPP)	21
4.1.19	Metrologie voor hoge-druk gas en vloeibare waterstofflows (MetHyInfra)	22
4.1.20	Metrologie voor waterstof (Met4H2)	23
4.1.21	Metrologie voor CCUS (MetCCUS)	23

4.2	Milieu	23
4.2.1	Metrologie voor herleidbare kwikmetingen (SI-Hg).....	23
4.2.2	Metrologie voor klimaatrelevante VOC's (MetClimVOC)	24
4.2.3	Metrologie voor Portable Emission Measurement Systems (MetroPEMPS)	25
4.2.4	Emissies van gevaarlijke stoffen uit bouwmaterialen in binnenlucht (MetRIAQ)	25
4.2.5	Emissie van ammoniak in de veehouderij (QuantiAGREMI)	26
4.3	Gezondheid	26
4.3.1	Radiometrie voor fotobiologische veiligheid.....	26
4.3.2	Metrologie voor 'Temporal Light Modulation' (MetTLM).....	26
4.3.3	Metrologie voor draagbare lichtloggers en optische dosimeter (MeLiDos).....	27
4.3.4	Herleidbaarheid voor röntgendiagnostiek (TraMeXi)	27
4.4	Geavanceerde elektronica	28
4.4.1	Metrologie voor watersporen in ultrapure gassen (PROMETH2O)	28
4.4.2	HF-metrologie voor toekomstige communicatiebehoeften (FutureCom)	29
4.4.3	Metrologie voor nanowire energy harvesting devices (NanoWires)	30
4.4.4	HF-metrologie voor supergeleidende quantumcircuits	30
4.4.5	Hybride 4D-fabricagemethode (AMPERE)	31
4.4.6	De grenzen van optische nanodimensionele metrologie verleggen (POLight).....	32
4.4.7	Herleidbare dimensionele metingen voor de industrie gebruikmakend van optische microscopie (TracOptic)	33
4.4.8	Herleidbare optische constanten en nanolaagjes (ATMOC).....	33
4.5	Digitalisatie	34
4.5.1	EMN Mathmet (Mathmet).....	34
4.5.2	Raamwerk voor data science en modellering	35
4.5.3	Betrouwbare virtuele experimenten en digital twins (ViDiT)	36
4.5.4	Fundamentele eigenschappen van sensor netwerken (FunSNM).....	36
4.6	Overige projecten	36
4.6.1	Verbetering van bestaande chemiefaciliteiten	36
4.6.2	Ontwikkeling kalibratiemethode voor viscosimeters	37
4.6.3	Verbetering bestaande faciliteiten DC/LF	37
4.6.4	Verbetering bestaande faciliteiten HF	38
4.6.5	Pulse-driven Josephson	38
4.6.6	Concept voor een echte 8-digit digitizer (True8Digit).....	38
4.6.7	Verbetering bestaande faciliteiten TF.....	39
4.6.8	Verplaatsbare optische klokken (TOCK).....	39
4.6.9	Verbetering bestaande faciliteiten Lengte	39
4.6.10	Verbetering bestaande faciliteiten Optica	40
4.6.11	Nieuwe kalibratiestandaarden en -methoden voor radiometrie en fotometrie na uitfasering van gloeilampen (NEWSTAND)	40
4.6.12	LED-gebaseerde schaalrealisatie voor illuminantie, lichtstroom en luminantie	40
4.6.13	Verbetering bestaande faciliteiten Volumetrie	41

5 Lijst met afkortingen 42

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 2023 hebben wij ons European Center for Flow Measurement op de Rotterdamse Maasvlakte geopend. Het testen en kalibreren van flowmeters wordt steeds belangrijker en moet steeds nauwkeuriger worden uitgevoerd. Bijvoorbeeld omdat vloeistoffen duurder of schaarser worden, zoals schoon en veilig drinkwater. Ook zien wij in de zoektocht naar duurzamere brandstoffen steeds meer vraag naar nieuwe soorten vloeistofmeters. Zo draagt het nieuwe European Center for Flow Measurement ook haar steentje bij aan de energietransitie.

Zonder wetenschappelijke meetstandaarden is innovatie niet mogelijk. Wij werken aan vele researchprojecten om de meetvraagstukken voor de toekomst op te kunnen lossen. Deze researchprojecten beslaan een breed gebied. Naast de energietransitie, klimaat en industriële toepassingen, ontwikkelen wij bijv. ook meetmethoden om stoffen in bloedbanen te kunnen meten om daarmee de gezondheidszorg te ondersteunen.

In 2023 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 researchprojecten. Meer detail leest u hierover in deze verantwoording. Jaarlijks spreken wij een werkprogramma af met het Ministerie van Economische Zaken & Klimaat, 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 vsl@vsl.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 eerlijke 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 en Klimaat aangewezen als Nationaal Metrologie Instituut en belast met het beheer van de primaire standaarden voor Nederland. Voor het beheer van deze nationale standaarden is de Standaarden Beheer Overeenkomst (SBO) afgesloten. 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.

De kwaliteit van het standaardenbeheer wordt gewaarborgd door middel van een ISO 17025 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. Daarvoor ontvangt VSL aparte financiering vanuit het Ministerie van EZK in de vorm van een researchsubsidie. Belangrijke onderzoeksthema's waaraan in 2023 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 een apart onderzoeksprogramma's op het gebied van metrologie: het European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR) en de opvolger daarvan, het European Partnership on Metrology (EPM). De looptijd van deze projecten bedraagt typisch drie jaar.

3 SBO

De totale omvang van het SBO-programma voor meetstandaardenbeheer (EZK verplichtingen nr. 1300033591) bedroeg in 2023 € 6.908.810,54.

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 en laboratoriumautomatisering.

Hieronder worden de daarvoor verrichte werkzaamheden per vakgebied nader toegelicht.

3.1 Chemie

Het jaar 2023 is voor de Chemiegroep goed verlopen. Er is een enthousiast team in goede personele gezondheid.

Ter onderbouwing van de CMC's voor gasmengsels met BTEX (benzeen, toluen, ethylbenzeen, p-xyleen, m-xyleen en o-xyleen), siloxanen in methaan, zuurstofhoudende vluchtige organische stoffen in stikstof, stikstof monoxide, aardgas, raffinage- en coke-oven gas zijn nieuwe CMC's ingediend. Ongeveer de helft van de ingediende CMC's is in de eerste ronde geaccepteerd. Voor de overige CMC's is extra informatie aangeleverd. Voor de review van CMC's voor 2022 en 2023 is vanuit BIPM nog een inhaalslag uitgevoerd, hetgeen voor Chemie betekent dat er veel reviews uitgevoerd moeten worden. Voor begin 2024 wordt het laatste restant van deze activiteit verwacht. De onderbouwing van CMC's is op de website van VSL verschenen, zodat deze net als de prestaties in key comparisons door iedereen kan worden ingezien.

Bij de Key Comparisons zijn CCQM-K118 (aardgas), CCQM-K3.2019 (automotive) en EURAMET.QM-K3.2019 (automotive) gepubliceerd. De vierde key comparison waar VSL de coördinator van is, CCQM-K174 (oxygenates in stikstof), loopt op schema. CCQM-K77.2023 (Rafinagegas) is gestart en daar zijn in de laatste maanden van 2023 mengsels voor gemaakt. De resultaten van het succesvol verlopen bilateraal met NPL voor siloxanen, zijn voorbereid voor publicatie.

Het werk aan het EMN Energy Gases (European Metrology Network, zie ook onder Research) gaat gestaag verder. Het research project is succesvol afgerond en verder voortgang wordt ondersteund vanuit het SBO infrastructuur budget. Het EMN Climate and Ocean Observation richt zich op onderzoeksthema's om de ontwikkelde Strategic Research Agenda uit te voeren. Verder is meegewerkt aan het afronden van de scope van het nieuwe EMN Clean Energy en is deelgenomen aan de kick-off van het EMN Pollution Monitoring. Vanuit alle EMN's zal input worden gehaald voor voorstellen aan de EPM Green Deal call 2024.

VSL levert de voorzitter voor ISO/TC193 (aardgas) en ISO/TC193/SC1 (analyse van aardgas). De ISO/TC193 vergadering vond in juni 2023 bij NEN plaats. Het voorzitterschap van ISO/TC158 liep eind 2022 af en is ceremonieel overgedragen aan de nieuwe voorzitter (China) in april 2023. VSL blijft, via een werkgroep convenor, projectleider en NEN 310 158, actief deelnemen aan deze belangrijke TC en zo haar invloed behouden.

3.2 Massa en gerelateerde grootheden

Het eerste halfjaar van 2023 is voor de groep zeer uitdagend verlopen. Eén van de "werkpaard" instrumenten van de massa technologie, zijnde de A1000 weegrobot voor 10 – 1000 g, is er na 23 jaar trouwe dienst mee gestopt. Reparatie was niet meer mogelijk en de investering van 209 k€ was geen onderdeel van de begroting in het initiële werkplan. Gelukkig is financiering gevonden door bij de andere technologieën enkele investeringen op een reservelijst te plaatsen en deels naar 2024 door te schuiven. Het goede nieuws is dat de nieuw bestelde weegrobot al eind juli 2023 geleverd kon worden, waardoor het beheer nauwelijks hinder heeft ondervonden.

Het automatiseringsproject dat in 2021 is begonnen, is voortgezet in 2023. Met de beschikbare hoeveelheid uren is inmiddels de aansturing van de weegrobots gekoppeld aan de software en kunnen volledige metingen met de 10-100 gram robot automatisch worden uitgevoerd. Deze softwarevernieuwing is in het tweede deel van 2023 voortgezet en zal ook de komende jaren worden voortgezet volgens het dit jaar geschreven automatiserings-meerjarenplan.

Ondanks de genoemde tegenvaller in het eerste halfjaar is alles wel de goede kant op gevallen en wordt er met plezier en optimisme uitgekeken volgend jaar! De hoeveelheid externe kalibraties is iets hoger dan begroot, wat mogelijk een extra boost geven aan de externe zichtbaarheid van het werk van de groep.

3.3 Thermometrie

De klantenkalibraties voor contactthermometrie en luchtvochtigheid kunnen conform de RVA scope worden uitgevoerd. Dit betreft de volledige scope van voor de schorsing van enkele jaren geleden, met uitzondering van een probleem met het koperpunt. De klanten die in 2022 waren teruggekomen, zijn in 2023 gebleven en daarnaast komen er ook weer nieuwe bij. Er wordt actief gewerkt om deze groei voort te zetten. Op het gebied van kennisoverdracht zijn in maart en november 2023 cursussen gegeven bij VSL voor een extern deelnemersveld.

De software van de meetsystemen van Thermonie is verder gemoderniseerd en in het standaardenbeheer is geïnvesteerd in de aanschaf van nieuwe apparatuur en upgrades van bestaande apparatuur. De Thunder (Vocht) is succesvol gerepareerd waardoor de geplande investering van 80 k€ kan worden uitgesteld. De sensoren van KlimReg (VSL-klimaatregistratiesysteem) functioneren naar behoren en zijn voorzien van een geldige kalibratie. De vervanging van de KlimRegsoftware is in 2023 afgerond, met nog wat implementatie- en trainingsactiviteiten in 2024.

Het kwaliteitssysteem is op orde en de RvA-audit voor Vocht, mei 2023, is redelijk succesvol verlopen. Er is weliswaar een aantal afwijkingen naar voren gekomen, maar deze waren allemaal goed oplosbaar en de technologie zal hier profijt van hebben. De afwijkingen hadden veelal betrekking op kennisoverdracht en training, wat duidelijk nog een gevolg is van de personele wijzigingen van de voorgaande jaren. Met het volgen van externe training en het opdoen van ervaring voor de nieuwe teamleden zal dit verbeteren. De oplossingen en voorgestelde corrigerende maatregelen zijn door de RvA geaccepteerd.

VSL heeft een succesvol resultaat behaald in de CCT Key Comparison K7 (vergelijk van watertripelpuntcellen) en in de KC EURAMET.T-K8 (dauwpunten). De resultaten van de CCT-K9 zijn gepubliceerd, ruim 10 jaar na uitvoering van de comparison, waarbij een significant deel van het deelnemersveld een afwijkend resultaat heeft behaald voor zink en argon, inclusief VSL. Voor argon is de onzekerheid aangepast en voor zink is de organisatie voor een aanvullend comparison georganiseerd en uitgevoerd. De resultaten hiervan zullen begin 2024 bekend worden.

3.4 Elektriciteit

Het beheer bij Elektriciteit is grotendeels volgens plan verlopen.

De Josephson opstelling is defect geraakt en inmiddels weer operationeel door het tijdelijk lenen van een counter elders. Veel componenten zijn echter "End-Of-Life", vandaar dat gezocht wordt naar mogelijkheden om de Josephson opstelling te vervangen.

Bij testen is gebleken dat de nieuwe software voor de Henderson brug nog fouten bevatte. De nieuwe softwareversie zit nu in het testtraject. Tijdens de validatie bleken er nog bugs te zitten in de stabiliteit van de software.

De bestelde weerstandsmeetbrug moest opnieuw geproduceerd worden vanwege te grote afwijkingen. De nieuw geproduceerde brug is gekalibreerd en is in juli 2023 geleverd. Na ontvangst is een eerste validatie door VSL gedaan die de nauwkeurigheid van de meeste meetbereiken bevestigde. Het

hoogste meetbereik vertoonde echter afwijkingen, die momenteel door de fabrikant verholpen worden. Deze werkzaamheden zijn opgenomen in het verbeterproject voor DCLF (zie de Research-rapportage), en zullen worden afgerond onder beheer in 2024.

Aan de Universiteit van Twente zijn de eerste efficiëntiemetingen aan 150 W USB laders op basis van een GaN power inverters uitgevoerd. De bouw is gestart van een nieuwe calorimeter voor efficiëntiemetingen van hoog-efficiënte vermogenslektronica. De opstelling voor het breedbandig vergelijken van hoge-stromen shunts is nog niet functioneel. Extra resultaten zijn behaald in verliesmetingen aan vermogenstransformatoren, precisie-meting van gepulste MRI stromen, en schattingen van batterij capaciteit m.b.v. machine learning. In 2023 zijn in totaal 3 journal papers gepubliceerd en 13 conferentiepapers; daarnaast is een eerste PhD student binnen de leerstoel gepromoveerd.

Het beheer van de S-parameters en HF-vermogen is volgens plan uitgevoerd. In 2023 is een bovengemiddeld aantal klantkalibraties uitgevoerd.

Op de FENELAB vergadering in oktober is een presentatie gegeven van de impact van het gereviseerde SI voor de Nederlandse industrie.

3.5 Tijd en Frequentie

Het beheer van de tijd- en frequentiestandaarden is grotendeels volgens schema verlopen. Er is in 2022 een nieuwe cesiumklok besteld, die in augustus 2023 is geleverd en in gebruik genomen, ter vervanging van een van de oude klokken, die aan het eind van zijn levensduur is. Met het huidige ensemble van drie operationele klokken is UTC(VSL) echter wel gegarandeerd.

Het modem van het Twee-weg-satelliet-tijd-en-frequentie-transfer (TWSTFT) systeem is uitgevallen en kan niet meer gerepareerd worden. Een vervangende modem was direct beschikbaar. Met enkele aanpassingen in de software, was het TWSTFT-systeem binnen twee dagen weer operationeel.

Daarnaast zijn de laboratoria van Optica en Ioniserende straling aangesloten op het interne White Rabbit netwerk voor een directe koppeling van deze faciliteiten met de tijd- en frequentiestandaard.

Er is veel voorbereidend werk gedaan voor een back-up locatie voor UTC(VSL). Het technisch ontwerp is verder uitgewerkt en de eerste apparatuur is aangeschaft. De definitieve beslissing over de locatie moet nog genomen worden.

VSL heeft een bijdrage geleverd in de CCTF-werkgroep die zich bezig houdt met herleidbaarheid van GNSS-tijdsignalen. De werkgroep heeft een rapport gepubliceerd dat ook voor de vele Nederlandse gebruikers van GNSS tijdsignalen nuttige informatie biedt over het omgaan met herleidbaarheid. VSL zal daarom ook bijdragen aan disseminatie van dit rapport onder de relevante klanten en contacten. Daarnaast heeft VSL de Nederlandse vertegenwoordigers in de Internationale Telecom Unie (ITU) geholpen met het formuleren van een standpunt over de afschaffing van de schrikkelseconden.

De bezetting van het team was stabiel met twee wetenschappers en een metroloog. Voor de continuïteit, wordt vanaf oktober 2023 een nieuwe metroloog ingewerkt.

3.6 Lengte

De frequentiekam vertoont veel storingen, zoveel dat dit veel meer tijd kost dan begroot. Daarom is het werk stilgelegd. Er is besloten om de frequentiekam te vervangen waar een nieuw ontwikkelproject voor is gestart in 2024. In de tussentijd moeten we voor kalibratie van een deel van onze eigen lasers een alternatieve interne kalibratieroute toepassen en voor een enkele laser uitwijken naar externe partijen.

Alle drie jodium-gestabiliseerde lasers waren defect geraakt, maar in 2023 door de leverancier gerepareerd. Twee lasers zijn voorzien van nieuwe laserbuis en de derde is schoongemaakt en opnieuw uitgelijnd. Een van de drie is extern gekalibreerd bij SMD in België en een tweede laser intern.

De twee metrologen die in 2022 zijn gestart zijn gedurende 2023 grotendeels opgeleid. Naar verwachting zal de opleiding op een aantal punten nog doorlopen in 2024, vooral met het oog op redundantie in de bemensing van de opstellingen.

De interne kalibraties hadden achterstand opgelopen door beperkt beschikbare capaciteit. Ook die achterstand is in de tweede helft van 2023 ingelopen. Ondanks deze achterstand is de kwaliteit van de dienstverlening geborgd gebleven.

M.b.t. de infrastructuur kan opgemerkt worden dat VSL voor een JCRB (Joint Committee of the Regional Metrology Organizations and BIPM) review de nieuwe CMC claims van NIMT (Thailand) en KRISS (Korea) op het gebied van vlakheidsmetingen beoordeeld heeft.

3.7 Optica

Het basisbeheer voor Radiometrie en Fotometrie is grotendeels volgens planning uitgevoerd.

Over het algemeen is het beheer van radiometrie redelijk verlopen. De kalibratie van de lineariteit van detectoren is begonnen en zal verder worden opgevolgd met een commercieel project begin 2024. Ook vordert de opleiding van de nieuwe medewerkers goed. Door een defect bij de Absolute Cryogene Radiometer (ACR) zijn hier uiteindelijk meer uren aan gependeed om de geplande kalibraties uit te voeren. In het begin van 2023 is de oriëntatie op de aanschaf van een nieuwe ACR afgerond en gerapporteerd. Voor verdere stappen wordt nu gewacht op het Strategisch Advies van de Raad van de Deskundigen en het nieuwe Meerjarenplan.

De computer van de RIGO goniometer is voorzien van de laatste software en een nieuwe SDD harde schijf. Dit zorgt voor verbeterde prestaties. Na herkalibratie van de faciliteit voor spectrale-irradiatiemetingen, in samenwerking met de leverancier, is de golflengte weer stabiel en zijn kalibraties voor klanten uitgevoerd.

Begin 2023 is gewerkt aan de key comparison EURAMET.PR-K3 die in 2022 was uitgesteld. De tweede ronde metingen voor EURAMET.PR-K3 zijn uitgevoerd, aan het rapport van de metingen wordt gewerkt. Dit ringvergelijk kost meer tijd dan begroot door de observatie van een groter verschil dan verwacht tussen de eerste en tweede ronde, in de gekalibreerde lichtsterkte van de lampartefacten. Er zal moeten worden gekeken of de gevonden verschillen acceptabel zijn in verhouding tot de geclaimde onzekerheid.

Er is deelgenomen aan de jaarlijkse vergadering van de EURAMET TC-PR, vergaderingen van CIE TC 2-89 en aan een workshop van de CCPR-werkgroep voor ringvergelijkingen.

3.8 Volumetrie

Het team van Volumetrie is dit jaar uitgebreid met een wetenschappelijk ontwikkelaar. Daarnaast loopt de opleiding van de twee collega's die in de tweede helft van 2022 zijn begonnen voorspoedig. Eind van het jaar zijn er een nieuwe operator voor LNG en een nieuwe metroloog bij waterflow gestart, beiden als vervanging van vertrekkende collega's.

Het beheer bij Lage Druk Gas is helemaal bij; er is echter wel een probleem met de stabiliteit van het kleinste volume van klok 3. Bij Hoge Druk Gas is het beheer voor dit jaar helemaal uitgevoerd.

Vloeistof en volume zijn na de verhuizing weer volledig geaccrediteerd, inclusief een uitbereiding met de WF2500-opstelling. Het beheer LNG is deels uitgevoerd en wordt parallel aan de restpunten van de verhuizing in 2024 afgerond.

Bij de RvA-audit van vloeistof en volume is een vijftal zaken opgemerkt; deze gaan over het verhuisplan dat nog niet volledig is uitgevoerd. Deze zaken zijn allemaal opgelost.

Erik Smits heeft namens VSL de voorzittershamer van de EURAMET TC Flow overgenomen.

3.9 Ioniserende straling

Het beheer van de faciliteiten onder SBO-beheer is volgens plan uitgevoerd. Diverse randapparatuur is defect geraakt, maar ook vervangen; zo is de investering van elektrometers in 2024 naar voren gehaald.

Voor de DIR-101 (bestralingsfaciliteit voor de kalibratie van dosimeters t.b.v. stralingsbescherming) worden de mogelijkheden onderzocht om deze verouderde faciliteit te vervangen door een nieuw modern systeem met een onderhouds- en supportcontract.

VSL heeft het voorzitterschap van de TC-IR voortgezet; in februari heeft de jaarlijkse meeting digitaal plaatsgevonden.

3.10 Metrologische infrastructuur

Alle relevante nationale en internationale vergaderingen zijn bijgewoond (fysiek, dan wel virtueel), waaronder de bijeenkomsten van EURAMET, EMPIR/EPM committee, CIPM, Fenelab en de Raad van Deskundigen (RvD).

De eindrapportages SBO en Research 2022 zijn begin 2023 ingediend en met de Raad van Deskundigen besproken. De eindversies van de werkplannen SBO en Research 2023 zijn eveneens bij EZK ingediend. Medio 2023 zijn de tussenrapportages opgesteld en in september met de RvD besproken. In de loop van de zomer is een nieuw format voor een gecombineerd werkplan voor SBO en Research ontwikkeld en afgestemd met EZK en de RvD. Het eerste werkplan in het nieuwe format voor 2024 is voor 1 oktober bij EZK ingediend.

Om in 2024 te komen tot een langetermijn investeringsplan voor alle faciliteiten is een inventarisatie uitgevoerd van kritische apparatuur, waarbij de interne kalibratiedatabase voor het beheer is aangevuld met informatie over technische toestand, verwachte levensduur en financiële (vervangings)waarde. Ook kritische instrumenten waar geen interne kalibraties op van toepassing zijn (zoals voedingen, pompen of gedempte optische tafels) is informatie toegevoegd aan de database.

Om te blijven voldoen aan de eisen van de CIPM MRA voor de wederzijdse erkenning van de nationale meetstandaarden en de daaruit voortvloeiende certificaten is in begin 2023 het kwaliteitssysteem van VSL zowel intern als extern getoetst. Deze toetsingen vinden plaats op de eisen van de normen ISO/IEC 17025:2017 en ISO 17034:2016 die de basis zijn voor deelname in de CIPM MRA. Aanvullend hebben toetsingen plaatsgevonden op de norm ISO/IEC 17043:2010 voor de organisatie van ringonderzoeken. Diverse interne technische beoordelingen hebben plaatsgevonden bij de technologieën, een systeembeoordeling door een externe deskundige en een directiebeoordeling over het functioneren van het kwaliteitssysteem. Waar nodig zijn aanpassingen gemaakt in het kwaliteitssysteem. Een belangrijke aanpassing is een verbeterde uitleg in het certificaat (het accreditatieblad) over de aanwijzing van VSL, de deelname in de BIPM MRA en de RvA accreditatie. Ook is het gebruik van het ILAC-logo op het certificaat door RvA goedgekeurd en doorgevoerd op het accreditatieblad.

Tijdens de externe beoordeling door de RvA zijn enkele observaties gemaakt ten opzichte van de normen. Binnen de afgesproken termijn zijn corrigerende maatregelen aan RvA gerapporteerd. Deze zijn deels al doorgevoerd en afgerond en deels worden deze in de loop van het jaar doorgevoerd. Verder is de jaarlijkse rapportage aan EURAMET TC-Q beoordeeld. Na het beantwoorden van een aantal (minor) vragen hebben de deelnemers hun vertrouwen uitgesproken over de operatie van het kwaliteitssysteem VSL en daarmee heeft VSL de deelname in de MRA gecontinueerd.

De kwaliteitsmanager van VSL heeft als lid van de stuurcommissie van de EURAMET TC-Q de 5-jaarlijkse her-evaluatierapporten over het functioneren van de kwaliteitssystemen van andere deelnemers in de CIPM MRA beoordeeld. Aan de hand van de beoordelingen hebben de NMIs en DIs de rapportages aangepast. Ook zijn er voorstellen gedaan om het systeem van beoordelen te verbeteren, met name voor de kwalificatie van de peer-assessors. Op nationaal niveau heeft de kwaliteitsmanager van VSL bijgedragen aan het versterken van de metrologische infrastructuur door met de voorzitters van de nationale technische commissies in overleg te gaan om een technische

commissie Kalibratie op te richten onder Fenelab. Daarnaast heeft de kwaliteitsmanager van VSL als voorzitter van de Commissie Accreditatie van Fenelab met de leden thema's uitgewerkt op het gebied van laboratoriumvergelijkingen, integriteitsrisico's, communicatie tussen RvA en de wijze van beoordelen. Zo hebben er overleggen plaatsgevonden tussen RvA en Fenelab over de Fast-Lane methode voor uitbreidingen van geaccrediteerde verrichtingen en Informatie gestuurd werken in aanloop tot risico gebaseerd beoordelen.

Het resultaat is dat de deelnemers in de TC-Q vertrouwen hebben in de operatie van het kwaliteitssysteem van VSL onder de CIPM MRA, de accreditatie voor kalibratie, productie van referentiematerialen en de organisatie van ringonderzoeken worden gecontinueerd en VSL als NMI bijdraagt aan het versterken van de metrologische infrastructuur in Nederland

Binnen het onderdeel "Beheer metrologische automatiseringsinfrastructuur" zijn alle systemen up-to-date en is het beheer op orde.

4 Research

De totale omvang van het Researchprogramma (EZK verplichtingen nr. 1300033996) bedroeg in 2023 € 6.511.000,00. Hiervan is € 3.969.000,00 gefinancierd door het Ministerie van EZK via de Researchsubsidie. Daarnaast is in totaal € 2.029.000,00 ontvangen aan overige Nederlandse en Europese subsidies.

Dit geld is besteed aan onderzoek naar nieuwe meettechnieken en -standaarden op het gebied van energie en klimaat, milieu, gezondheid, geavanceerde elektronica en digitalisering, alsmede overige projecten die niet aan een specifiek thema gekoppeld zijn.

Hieronder worden de verrichte werkzaamheden per project nader toegelicht.

4.1 Energie en Klimaat

4.1.1 Metrologie voor het achtergrondniveau van CO₂ in lucht

Dit project, dat loopt van januari 2022 tot en met december 2025, heeft tot doel bij te dragen aan een BIPM-faciliteit voor het vergelijken van meetschalen voor de molfractie koolstofdioxide in lucht. Begin 2022 is door BIPM een voorstel gedaan voor dit samenwerkingsproject. VSL gaat in het project het volgende doen:

1. Leveren van een set van zes mengsels van CO₂ in stikstof ter validatie van de manometrische opstelling bij BIPM om de molfractie CO₂ te meten.
2. Bepalen van de CO₂-adsorptie in de gebruikte cilinders.
3. Modelleren van de validatie experimenten bij BIPM en uitwerken van de validatiedata.
4. Analyseren van de data van de twee meetschalen voor CO₂ bij BIPM.
5. Optimaliseren van de experimentele aanpak van het vergelijken van de twee meetschalen voor CO₂ bij BIPM.
6. Bijdrage leveren aan het ontwerp en bouw van een databasesysteem voor het bewaren en beschikbaar maken van gegevens van CO₂ meetschalen en de conversie van meetresultaten van de ene naar de andere schaal.
7. Bijdragen aan de documentatie van voornoemde database.

Een set van vijf mengsels van CO₂ in stikstof is bereid en aan BIPM geleverd. De resultaten tussen VSL's gravimetrie en BIPM's manometrie komen goed overeen. De resultaten van dit vergelijk (CCQM-P225) zijn in Metrologia gepubliceerd (<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0026-1394/60/1A/08029>).

4.1.2 European Metrology Network Energy Gases (Energy Gases)

Dit Joint Network Project (JNP), dat liep van mei 2019 tot en met april 2023, had als doel ondersteuning te bieden voor het European Metrology Network (EMN) voor Energy Gases. Het project is afgelopen op 30 april 2023 en alle doelen zijn gehaald. De rapportage is afgerond en goedgekeurd.

De Strategic Research Agenda (SRA) is in november 2020 voor het eerst gepubliceerd op de website van het EMN (www.EURAMET.org/energy-gases), gevolgd door herzieningen in 2022 en 2023. Het document is gericht op de metrologiegemeenschap en relevante belanghebbenden in energiegassen en beschrijft de opkomende meetuitdagingen in verband met de energietransitie. VSL heeft een bijdrage geleverd aan het schrijven van de SRA (en herzieningen) en van een peer-reviewed artikel "Visie voor een Europees metrologienetwerk voor energiegassen" (<https://doi.org/10.1088/2634-4505/ac57f6>) dat in maart 2022 is gepubliceerd. De SRA is een belangrijk instrument gebleken bij het definiëren van potentiële onderzoeksthema's (PRT) in calls 2021-2023 van het EPM programma.

Het meetserviceplatform is compleet en draait live op de website van het EMN. Het visualiseert met eenvoudige zoekhulpmiddelen de diensten die door de EMN-leden worden geleverd voor diverse

soorten energiegassen (aardgas, waterstof, biogas, LNG, CO₂). Diensten omvatten kalibraties, referentiematerialen, trainingen en ringvergelijken. VSL was betrokken bij het bouwen van de database en zal onderdeel van het goedkeuringsproces blijven.

De samenwerking met Hydrogen Europe (HE) en Hydrogen Europe Research (HER), begonnen in 2021, werd geformaliseerd door een Memorandum of Understanding (MoU) ondertekend door EURAMET namens het EMN in maart 2023. Ook is er een MoU ondertekend met European Gas Research Group (GERG) in november 2022, met VSL als het primaire contact.

VSL heeft, met het metrologisch instituut van Bosnië en Herzegovina (IMBIH), drie voorbeelden van samenwerking in het kader van het EMN uitgewerkt. Dit betreft de gezamenlijke aanpak van NMI's voor het geven van trainingen, het doen van gezamenlijke onderzoek en het organiseren en uitvoeren van ringvergelijken. Het doel van deze voorbeelden is om synergie tussen de EMN-leden en stakeholders op het gebied van kennisoverdracht en opleidingsdiensten te vergroten, met name daar waar het de individuele scope van een enkel NMI overstijgt.

Twee stakeholder workshops zijn in 2020 en 2023 bij NPL (UK) en IPQ (Portugal) gehouden met een VSL bijdrage om de betrokkenheid bij stakeholders te versterken, hun meetbehoeften te begrijpen en de EMPR/EMPIR-projectresultaten te presenteren.

Een video en een infographic over het EMN en de rol van metrologie in de gasenergietransitie zijn door NEL (UK) en VSL geproduceerd en aan de EMN-website toegevoegd.

VSL heeft vijf lezingen gehouden in internationale conferenties en bijgedragen aan ruim twintig andere impactactiviteiten, waaronder bijdragen aan normalisatiecommissies vergaderingen en stakeholderevenementen.

De link naar de projectwebsite is: www.EURAMET.org/european-metrology-networks/energy-gases/.

4.1.3 Metrologie voor isotoopanalyses (STELLAR)

Het EMPIR-project STELLAR, dat liep van september 2020 tot en met augustus 2023, had tot doel om referentiegasmengsels te maken van methaan met een bekende isotoopsamenstelling, op buitenluchtconcentratieniveau, om onderscheid te kunnen maken tussen antropogene en natuurlijke emissies. Er is begonnen met de inventarisatie van de isotoopverhoudingen van de beschikbare pure methaanbronnen. Op basis hiervan is een keuze gemaakt voor de aanschaf van methaan om de gewenste δ -ranges voor ¹³C-CH₄ en ²H-CH₄ te produceren.

Het is uiteindelijk gelukt om methaan van biogene oorsprong te krijgen in de vorm van samples uit Finland (drie cilinders, lage druk) en uit Nederland (twee cilinders, hoge druk). De zuiverheidsanalyse liet zien dat het gas uit de Nederlandse biomethaaninstallatie de gewenste zuiverheid heeft, terwijl de samples uit Finland te veel CO₂ bevatten. Kleine samples van de Nederlandse biomethaan zijn gestuurd naar projectpartner Max-Planck-Institute for Biogeochemistry in Jena, dat de isotoopsamenstelling heeft bepaald in dit gas ter bevestiging van de biogene oorsprong. Cilinders met methaan van fossiele oorsprong (met bekende isotoopsamenstelling) en de benodigde matrixgassen waren al eerder verkregen via een projectpartner. Daarnaast zijn ook mengsels gemaakt uit aangeschafte pure isotopen ¹²CH₄, ¹³CH₄ en ¹²CH₃D. Een vijftal mengsels is gestuurd naar projectpartner EMPA. De CRDS-spectrometer (Cavity Ringdown Spectrometer) is opgebouwd. De behaalde effectieve absorptiepadlengte van 7,5 km is een grote vooruitgang t.o.v. het bestaande systeem en dit is ook nodig om de lage fracties ¹²CH₃D (ongeveer 1 nmol/mol in lucht) te kunnen bepalen. Een artikel over het verkrijgen van de biomethaansamples is geplaatst op de projectwebsite.

De meetmethode is afgerond en de beschrijving hiervan in de vorm van een werkinstructie volgt als kleinschalige extra activiteit in het methaan beheer. Er zijn aan het einde van het project ook mengsels gemaakt op atmosferische concentratie (2 ppm) met drie verschillende isotoopsamenstellingen (fossiel, biogeen en gemengd). Het Max-Planck-Institute heeft samples van deze mengsels geanalyseerd. Verder is er een online poster presentatie gegeven op hybrid workshop on Carbon Dioxide and Methane Stable Isotope Ratio Measurements.

De link naar de projectwebsite is: <http://empir.npl.co.uk/stellarproject/news-events/>.

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

Een van de doelen van het EMPIR-project Decarb, dat loopt van juni 2021 tot en met mei 2024, is het ontwikkelen van een metrologische infrastructuur voor debietmetingen van waterstof en van met waterstof verrijkt aardgas, zodanig dat deze metingen voldoen aan de vereisten van de EU Measuring Instruments Directive (MID). In verband met de manier waarop een deel van de beschikbare waterstof wordt gegenereerd (omvormen van methaan, waarbij CO₂ vrijkomt), is ook de bemetering van CO₂ van belang. Hierbij moet worden voldaan aan de eisen van het EU Emissions Trading System.

In het werkpakket over debietmeting is het literatuuronderzoek over CO₂ flowmetertechnologie afgerond. Ook voor het testen van de flowmeters met resp. CO₂ en HENG (Hydrogen Enriched Natural Gas) zijn gasmengsels besteld bij een commerciële gasleverancier en zijn de experimenten uitgevoerd.

In het werkpakket voor chemische samenstelling zijn mengsels met verontreinigingen in CO₂ gemaakt en is gestart met het ontwikkelen van meetmethodes met Fourier Transform Infrared Spectrometrie (FTIR). De eerste resultaten zijn in 2022 gedeeld met het consortium en in 2023 is verder gewerkt aan de validatie van de methodes. Voor NO₂ is de methode-ontwikkeling afgerond en zijn de detectielimieten in zowel de 10 meter cel als de 10 cm cel bepaald. Deze zijn ruim voldoende om ook aan een toekomstige verlaging van de grenswaarde in de regelgeving voor NO₂ voor CCUS te voldoen. Ook CO is goed te meten met de FTIR, maar de methode geeft wel grote kwantitatieve afwijkingen van de verwachte resultaten. Na overleg met een expert van het BIPM zijn er aanpassingen uitgevoerd maar deze moeten nog worden geëvalueerd. De derde stabiliteitsmeting voor de mengsels met verontreinigingen in waterstof (grade A) zijn uitgevoerd en voor N₂ en CO is nog geen instabiliteit geconstateerd. Voor H₂O lijkt wel enige instabiliteit op te treden.

Het onderzoek naar de bruikbaarheid van sorption tubes voor het bepalen van verontreinigingen in CO₂ is uitgevoerd en de resultaten zijn gedeeld met RISE en een draft rapport is beschikbaar. Veel onzuiverheden kunnen wel goed geanalyseerd worden met sorption tubes maar helaas veelal met verschillende sorption materialen. Er is nog geen methode gevonden om met één of twee buizen het hele scala aan verontreinigingen te bemonsteren. Voor de comparison van hydrogen enriched natural gas (HENG) zijn de testmetingen uitgevoerd en uiteindelijk heeft een tweetal deelnemers zich aangemeld. De apparatuur is in december bij VSL aangeleverd, geïnstalleerd en getest, waarna de comparison in januari 2024 zal worden uitgevoerd.

De link naar de projectwebsite is: www.decarbgrid.eu.

4.1.5 HyScaling

Het HyScaling project is van start gegaan in september 2021 en loopt tot en met augustus 2024. Het betreft een nationaal project (RvO MOOI subsidie) gericht op het ontwikkelen van waterstoftechnologie en met name de ontwikkeling van betere electrolyzers, om efficiënt en goedkoop groene waterstof te kunnen produceren. De roadmap, ontwikkeld door VSL met input van TNO (en nu gepubliceerd op ISPT website), over de huidige en toekomstige meetvereisten voor waterstofproductie en utilisatie is begin 2023 gepresenteerd aan de projectpartners (<https://ispt.eu/publications/roadmap-of-the-measuring-requirements-for-green-hydrogen-production-by-electrolysis/>).

VSL nam deel aan een interview met een wetenschappelijk schrijver voor de voorbereiding van een technisch artikel over de huidige en toekomstige meetvereisten voor elektrolyse waterstofproductie. Het artikel is nog niet gepubliceerd.

VSL heeft deelgenomen aan de projectmeetings in deze periode. Ook neemt VSL deel aan het projectboard van het HyScaling project. Dit projectboard geeft sturing aan het project.

De link naar de projectwebsite is: <https://ispt.eu/projects/hyscaling-establishing-a-dutch-electrolyzer-industry/>.

4.1.6 SI-herleidbare validatie van methodes voor biomethaan conformity assessment (BiometCAP)

Het EPM-project BiometCAP, dat loopt van oktober 2022 tot en met september 2025, richt zich op biomethaan conformity assessment.

Voor biomethaan conformity assessment zijn methodes voor de dynamische bereiding van transfergasstandaarden met verschillende soorten verontreinigingen benodigd. Bij de start van het project is een overzicht gemaakt van de benodigde materialen en chemicaliën. Er is een enquête naar de stakeholders uitgezet over de gewenste samenstelling van de benodigde gasmengsels. De bereiding van diverse geselecteerde gasmengsels bij VSL wordt uitgevoerd. De kalibratie en validatie testen van de dynamische voorbereidingsfaciliteit worden uitgevoerd conform plan.

De ontwikkeling van een protocol “voor de validatie en de evaluatie van de prestatiekenmerken van analytische meetinstrumenten en de methodes, die worden gebruikt bij de conformity assessment van biomethaan” is in gang, zij het met enige vertraging vanwege een gebrek aan personeel van het leidende partnerinstituut. Dit is inmiddels wel weer opgelost. Het selecteren van de testparameters wordt in samenwerking met de andere projectpartners uitgevoerd.

De stakeholdercommissie is ingesteld en de eerste bijeenkomst is in maart 2023 georganiseerd. Het project is gepresenteerd aan normalisatiewerkgroepen (bijv. ISO/TC193/SC1/WG25, NEN NC310408 over ‘biomethaan’) en aan relevante netwerken (zoals het EMN Energy Gases en GERG) en bij diverse conferenties. Er wordt een overzichtsartikel gepubliceerd.

De link naar de projectwebsite is: <https://www.npl.co.uk/biometcap>.

4.1.7 Green Transport Delta – Waterstof

Het Green Transport Delta – Waterstof project is formeel gestart in september 2021, maar de activiteiten zijn vanaf januari 2022 begonnen bij VSL en lopen tot en met december 2025. Het betreft een nationaal project (RvO subsidie) gericht op het ontwikkelen van waterstof voor zwaar transport en de bijbehorende tankinfrastructuur. VSL leidt hierbij het WP over tankinfrastructuur. In dit WP zijn tevens TNO, Bronkhorst, Krohne, Hobraé en Resato betrokken. De scope(s) van alle activiteiten in samenwerking met de andere partners is vastgelegd. Er zijn conceptontwerpen ontwikkeld voor de door VSL te ontwikkelen faciliteiten en de meeste onderdelen zijn inmiddels besteld en binnen gekomen.

Eén van de taken heeft een wijziging ondergaan, doordat het voorgestelde drukbereik in het projectvoorstel niet voldoende overlap met de praktijk bleek te hebben. Deze taak is opnieuw geschreven en de wijziging is doorgegeven aan RvO en geaccepteerd.

De specificaties voor de fast-filling flow kalibratiefaciliteit zijn inmiddels vastgelegd en het ontwerp wordt beschreven. De benodigde flowmeter is inmiddels besteld.

Voor de gaskalibrator voor het meten van onzuiverheden is het ontwerp afgerond en zijn de meeste onderdelen besteld en geleverd. De onderdelen voor het behalen van de benodigde onzekerheid bestaan niet in een ATEX variant, maar voor de inzetbaarheid van de kalibrator bij veldtesten is nog een alternatief plan gemaakt. De bereiding van referentiematerialen is uitgesteld om mogelijke instabiliteit te voorkomen op het moment van de validatie van de gaskalibrator die in 2024 is gepland.

VSL heeft deelgenomen aan projectgroep meetings, stuurgroep meetings en diverse WP-meetings.

4.1.8 Waterstofbemonstering voor zwaar transport (MetHyTrucks)

Dit project is per 1 juni 2023 van start gegaan en loopt tot en met mei 2026. Het project richt zich op het ontwikkelen en validatie van bemonsteringsmethodologie voor waterstofstations voor het vrachtverkeer en bussen. Binnen het Europese project leidt VSL het werkpakket ‘Ontwikkeling van protocollen en richtlijnen’.

VSL heeft een tweetal documenten opgesteld en met de partners gedeeld (review samplingsystemen en review bestaande protocollen voor de validatie van H₂-samplingsystemen of voor offline kwaliteitscontrole).

De link naar de project website is: <https://www.ri.se/en/methytrucks>.

4.1.9 Ondersteuning voor een Europees Metrologie Netwerk op het gebied van Slimme Elektriciteits-netwerken (SEG-Net)

Het Joint Network Project (JNP) SEG-Net ter ondersteuning van het European Metrology Network Smart Electricity Grids (EMN SEG) is gestart op 1 mei 2019 en eind april 2023 succesvol afgerond.

De Strategic Research Agenda (SRA) is afgerond, inclusief een implementatieplan dat aansluit op de roadmap visualisaties van het in 2021 gepubliceerde ENTSO-e 2030 visie rapport. De eindversie van de SRA is begin 2023 met de EMN SEG leden besproken, waarna het rapport definitief is gemaakt.

De EMN SEG website (<https://www.EURAMET.org/smart-electricity-grids>) is verder van informatie voorzien. Een uniek element van de website is dat informatie beschikbaar is over zowel relevante JRP projecten als de acht EMN SEG thema's. In de laatste maanden van het SEG-net project is de laatste JRP informatie op de website gezet en is een 'user manual' gemaakt zodat anderen in de toekomst ook eenvoudig het onderhoud van de website kunnen uitvoeren.

Het rapport met de visuele presentatie van alle diensten, faciliteiten en toekomstplannen van de EMN leden is samen met PTB verder uitgewerkt zodat sneller inzicht verkregen kan worden in de 'gaps' en kansen voor nieuwe meetstandaarden om stakeholder behoeften af te dekken. Begin 2023 is dit rapport gepresenteerd op een extra 'in-person' vergadering in Berlijn en is met de EMN SEG leden besproken hoe dit rapport kan bijdragen aan "Smart Specialisation" van de NMI's in Europa op het gebied van metrologie voor elektriciteitsnetten.

In maart is een presentatie van de EMN SEG activiteiten op de internationale Metrologie conferentie gegeven (Lyon, Frankrijk). Verder is er in april een key note lezing gehouden op de SMAGRIMET conferentie (Cavtat, Kroatië).

4.1.10 Metrologie voor energietransport (FutureEnergy)

Het EMPIR-project FutureEnergy is op 1 juni 2020 van start gegaan en op 31 mei 2023 succesvol afgesloten. VSL heeft aan twee onderdelen binnen dit project gewerkt: het realiseren van een LI-kalibratiefaciliteit (LI = Lightning Impulse) en het ontwikkelen van een methode voor de bepaling van lineariteit van hoogspanningsdelers met een nauwkeurigheid beter dan 500 ppm.

Voor het realiseren van een LI-faciliteit met een bereik van minimaal 300 kV en onzekerheid van 1 % is uitgebreid literatuuronderzoek gedaan en gesproken met andere meetinstituten die al een dergelijke faciliteit hebben. Vervolgens zijn de onderdelen van de opstelling bij de collega-NMI's van respectievelijk China (NIM) en Zweden (RISE) aangeschaft en gekalibreerd. In 2022 is een uitgebreide meetcampagne gehouden in de hoogspanningshal van de TU Delft, waarbij de VSL en TU Delft LI meetsystemen zijn vergeleken met die van RISE, VTT, PTB, NIM en Haefely. In 2023 is de data van deze meetcampagne systematisch verder uitgewerkt. Een peer-reviewed paper over deze resultaten is geaccepteerd voor presentatie op de ISH 2023 conferentie (augustus 2023, Glasgow).

Een kalibratieprocedure is geschreven voor on-site kalibratie van industriële LI meetsystemen met behulp van het VSL referentiesysteem. CMC's zijn vervolgens ingediend voor opname in de KCDB voor LI testspanning, 'front time' en 'time-to-half-value' met onzekerheden van respectievelijk 0.7 %, 3.0 % en 1.5 % voor spanningen tot 600 kV en respectievelijk 1.2 %, 5.0 % en 3.0 % tot 1200 kV. Er zijn verschillende verbeteringen in het VSL LI referentiesysteem aangebracht om de performance verder te verbeteren, zoals verbeterde stap respons van de deler, verbeterde aarding, en aanpassing en verificatie van het laagspanningsdeel van de deler. Verder zijn studies uitgevoerd naar de niet-lineariteit en onzekerheidsbijdragen van de LI deler en naar effecten die de waarde en onzekerheid van de LI

tijdparameters beïnvloeden. Tenslotte is het hele VSL LI systeem in een metalen meetrek gemonteerd om het zo geschikt te maken voor het uitvoeren van nauwkeurige on-site kalibraties.

Voor het nauwkeurig meten van extreem hoge wisselspanningen (tot 800 kV) moet de spanningsafhankelijkheid van onderdelen worden bepaald. Het meten van dit soort spanningen wordt voornamelijk gedaan met hoogspanning (HV) gascondensatoren. In het project zijn twee paden gevolgd om de spanningsafhankelijkheid beter te kunnen bepalen: nieuwe karakterisatietechnieken voor de HV-condensatoren en een veldmeettechniek, waar het elektrisch veld wordt gemeten met een veldsensor. Met de veldsensor zou de lineariteit van hoogspanningsdelers met een nauwkeurigheid beter dan 500 ppm gehaald moeten kunnen worden. Dit is ruim voldoende om in de behoefte van de industrie te kunnen voorzien. VSL was werkpakketleider van dit onderdeel.

VSL heeft een veldsensor ontwikkeld op basis van een dubbelzijdige PCB (Printed Circuit Board). Op basis van de tests die zijn uitgevoerd in het HV-laboratorium bij VSL tot een wisselspanningsniveau van 100 kV, heeft de veldsensor een stabiele en bevredigende prestatie zoals vereist, met een onzekerheid van beter dan 40 ppm en goede overeenstemming met de resultaten van het project partner VTT.

De link naar de projectwebsite is: <https://www.ptb.de/empir2020/futureenergy/>.

4.1.11 Meettransformatoren voor power quality metingen (IT4PQ)

Het EMPIR-project IT4PQ is gestart op 1 augustus 2020 en is eind juli 2023 afgerond met het indienen van de technische rapportage en de goedkeuring daarvan. VSL was werkpakketleider van WP1, waarin de eisen aan de meettransformatoren bij hogere frequenties (tot 5 kHz) werden vastgesteld. De hoofdtak van VSL binnen het project was het ontwikkelen van een meetopstelling voor de on-site kalibratie van Power Quality (PQ)-meettransformatoren. De VSL-inbreng concentreerde zich daarbij op de uitlezing van de output van de transformatoren met behulp van een comparator.

In 2020 is een start gemaakt met het ontwerp van een breedbandige comparator, gebaseerd op twee gesynchroniseerde digitizers. Daarnaast is, samen met INRIM en Universiteit van Campania, literatuuronderzoek gedaan ter bepaling van indicatoren en onzekerheidslimieten voor het evalueren van de nauwkeurigheid van PQ-meettransformatoren. INRIM, University of Campania, TU Dresden en VSL hebben over het project en deze eerste bevindingen een paper geschreven ter presentatie op de CIREC-conferentie (International Conference on Electricity Distribution). Daarnaast is door de projectpartners een gezamenlijk paper gepresenteerd op de CPEM-conferentie.

In 2021 is een definitief ontwerp gemaakt van de comparator en zijn de bijbehorende digitizer en stroomsensoren uitgezocht, aangeschaft en getest. Daarnaast is samen met de University of Campania een paper geschreven en gepresenteerd op de AMPS workshop over de relevante PQ-parameters voor meettransformatoren.

In 2022 is de comparator gebouwd met behulp van een precisie power quality analyzer. De software om de comparator aan te sturen is ontwikkeld en getest met behulp van golfvormen afkomstig van de opstelling voor power quality. De comparator werd uitgebreid bestudeerd en gekarakteriseerd met behulp van stroom- en spanningssignalen. De resultaten van de studie tonen aan dat de comparator kan worden gebruikt om instrumenttransformatoren in industriële omgevingen te kalibreren. Samen met de projectpartners werd een journal-artikel over instrumenttransformatoren voor power quality gepubliceerd.

In 2023 is de karakterisatie van de comparator afgerond en is een onzekerheidsbudget opgesteld. Met behulp van de comparator is deelgenomen aan een vergelijk voor CTs met harmonische en interharmonische verstoringen en modulaties, door de transferstandaard van PTB te vergelijken met de breedbandige VSL referentie-CT. Voor deze metingen is een uitgebreid meetrapport opgesteld dat ook als input is gebruikt voor de VSL bijdrage aan een Good Practice Guide die is verstuurd naar LNE als lead partner.

De link naar de website is: <https://www.it4pq.eu/>.

4.1.12 Ondersteuning voor een Europees Metrologie Netwerk op het gebied van Schone Energie (CleanEnergy)

In mei 2021 is dit Joint Network Project (JNP) gestart ter voorbereiding op een nieuw op te richten European Metrology Network (EMN) op het gebied van Schone Energie. In dit JNP, dat loopt tot en met april 2024, leidt VSL het WP3 dat het voorstel voor dit EMN voorbereidt. De focus heeft in het eerste halfjaar gelegen op het vaststellen van de scope. Hiervoor is een uitvoerige inventarisatie gedaan van vormen van schone energie en welke metrologische technieken relevant zijn voor de verschillende processtappen voor elke energiesoort. Ook is gewerkt aan een inventarisatie van lopende initiatieven en projecten en aan een strategie om daarmee interactie te hebben.

In 2022 is de scope afgestemd binnen het consortium en met de andere EMNs op het gebied van energie (Smart Electricity Grids en Energy Gases). De scope van het nieuwe netwerk werd bepaald als: "Het EMN Clean Energy richt zich op de opwekking, opslag en benutting van duurzame energie. De EMN Clean Energy is een aanvulling op de andere twee energie-EMNs: Energy Gases (waaronder waterstof en biogassen) en Smart Electricity Grids. In combinatie hiermee omvat het de conversie van energievormen (zoals power2X en X2power) en sectorkoppeling. Energie-efficiëntie wordt beschouwd als een integraal aspect van gebruik en conversie." Tevens is er een enquête gehouden om een eerste lijst met potentiële deelnemers voor het EMN vast te stellen.

Begin 2023 is het EMN formeel goedgekeurd door EURAMET. VSL is lid geworden van het EMN, waarbij de interesse vooral uitgaat naar batterijen en de afstemming met het EMN Energy Gases.

In 2023 is er verder een bijdrage geleverd aan de stakeholders database, stakeholders questionnaire, contact point database en aan verschillende brieven. Verder is input geleverd aan het document voor het 'technology landscape', en aan de discussie over bestaande metrologiefaciliteiten en -diensten op het gebied van schone energie in heel Europa, plus een bijdrage aan de allereerste draft van de SA (Strategic Agenda). Om het EMN te promoten is bijgedragen aan het opzetten van de website, de ontwikkeling van een survey voor potentiële deelnemers, het verzamelen van de afgelopen onderzoeksprojecten binnen EMRP, EMPIR en EPM op het gebied van Clean Energy, de projectposter die gepresenteerd is op de CIM 2023 en aan de ESEC flyer.

4.1.13 Metrologie voor DC-netten (DC grids)

In het EMPIR-project "DC grids", dat loopt van juni 2021 tot en met mei 2024 en waarvan VSL coördinator is, worden on-site metingen gedaan in DC-laagspanningsnetten, die momenteel in opkomst zijn. Het doel is om DC power quality (PQ) parameters en testsignalen voor elektriciteitsmeters te definiëren en de bijbehorende referentie-opstellingen te realiseren. VSL gaat zowel on-site metingen uitvoeren als aan de referentie-opstellingen werken.

In 2021 zijn de contractaanpassingen met EURAMET en de partners afgestemd en is een kick-off meeting georganiseerd. Een ontwerp van een on-site waveform recorder voor DC-netten is besproken met Alliander en TU/e. Daarnaast is een paper geschreven over de eerste metingen met de MeterEMI-opstelling, na aanpassing voor DC-metingen met een beperkt spanning-, stroom- en frequentiebereik.

In 2022 zijn componenten uitgezocht en aangeschaft voor een spanningsdeler ten behoeve van zowel de DC referentieopstelling als de on-site waveform recorder. De testmetingen aan de DC meter opstelling zijn uitgebreid naar hogere frequenties. De resultaten zijn gepresenteerd op de ICHQP conferentie in Napels. De eerste resultaten van het project, met name de initiële definities van de DC PQ parameters en de plannen voor on-site metingen, zijn besproken met de stakeholders tijdens een online stakeholder meeting. Een paper is op de CPEM in Nieuw-Zeeland gepresenteerd als poster. On-site metingen zijn uitgevoerd bij Lelystad Airport en in The Green Village in Delft; de meetresultaten moeten nog worden uitgewerkt. De M18 meeting is gecombineerd met een stakeholder workshop in Malaga die in-person of online bijgewoond is door meer dan 50 deelnemers.

Over de on-site meetresultaten in The Green Village is begin 2023 een peer reviewed open access paper geschreven die inmiddels is gepubliceerd in MDPI Energies. Nieuwe on-site metingen zijn uitgevoerd in een parkeergarage in Utrecht, waarover een conferentie paper is geschreven voor de

I2MTC in 2024. De referentie-opstelling voor DC vermogen is afgerond met behulp van een breedbandige 2 kV versterker en deler voor spanning en een 900 A DC bron en zeroflux transducer en shunt voor de stroom. Er is een start gemaakt met de DC PQ opstelling, waarbij gebruik wordt gemaakt van nieuwe software voor zowel AC als DC PQ. Begin 2023 is er een nieuwe project website gelanceerd om het werk van het consortium te promoten. Daarnaast zijn lezingen gegeven op de EURAMET TC-EM SC P&E, en voor Current OS (een stakeholder community voor DC grids), Dutch Power, en Stichting Gelijkspanning Nederland.

De link naar de website is: www.dc-grids.nl.

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

Per 1 september 2022 is het EPM-project Digital-IT gestart, dat loopt tot en met augustus 2025, met als doel inzicht te geven in de nauwkeurigheid van digitale apparatuur voor gebruik in onderstations en het vermogen om betrouwbare gegevens te leveren. Om dit vast te stellen is een referentie Stand Alone Merging Unit (SAMU) nodig. Deze is in de voorgaande projecten Future Grid I/II gemaakt. In deze projecten is echter alleen gefocust op de fundamentele 50/60 Hz frequentie van het lichtnet. In dit project wordt de uitbereiding naar harmonischen gedaan. Hiermee kan een SAMU getest worden tegen de IEC 61869-13 clauses 5.6.1301 and 5.6.1302. Dit betekent vooral de uitbereiding van de bandbreedte van de referentie SAMU.

Voor de uitbreiding van de bandbreedte van de VSL referentie SAMU wordt gekeken naar het inzetten van een commerciële Wattmeter. Momenteel zit er al een Wattmeter in de opstelling voor de herleidbaarheid in spanning en stroom op 50 en 60 Hz. De nieuwe Wattmeter kan naar veel hogere frequenties en kan ook worden gelockt aan een externe PTP1588 klok.

Om de SAMU streams te meten is er software gemaakt om deze te kunnen vergelijken. In de software worden packetfilters gedefinieerd die alleen de informatie van de te vergelijken SAMUs uit de datastreams haalt. Op deze informatie kunnen daarna de analyses worden gedaan voor het vaststellen van de nauwkeurigheid. We zijn nu in staat om twee (of meer) SAMUS met elkaar te vergelijken. De uitdaging ligt nu in het verwerken van de data die voortkomt uit de streams met hogere sample rate.

De opstelling die momenteel bij VSL staat, probeert zo goed mogelijk de process bus van een onderstation te na te bootsen. Timing is een belangrijk aspect voor de SAMU's, zodat deze allemaal simultaan meten en geen faseverschillen laten zien. Om deze reden zijn ook wetenschappers van het vakgebied Tijd en Frequentie betrokken bij dit project. Zowel de data streams als de tijddissemminatie gaat over het netwerk. De invloed van de hoeveelheid netwerkverkeer op de timing moet worden bepaald. Momenteel zijn we bezig met het bepalen van de synchronisatie nauwkeurigheid.

De huidige normen voor digitale apparatuur zijn nog niet duidelijk. Binnen het project zijn er verschillende contacten met stakeholders gelegd waar wordt gesproken over de interpretatie.

In 2023 is er gewerkt aan de uitbreiding van de bandbreedte van de SAMU. Dit bleek niet mogelijk met de huidige SAMU. Hiervoor is een alternatief op basis van een bestaand commercieel instrument geselecteerd wat ook meteen de synchronisatie met PTP oplost. Dit apparaat gaat in 2024 worden gekarakteriseerd na aanpassing van de huidige software.

De link naar de projectwebsite is: <https://www.ri.se/en/digital-it>.

4.1.15 Efficiëntiemetingen aan vermogenselektronica (Powerized)

Het KDT JU (nu Chips JU) project Powerized is gestart in januari 2023 en loopt tot en met december 2025. VSL is werkpakketleider voor WP2.4. Het doel voor VSL in dit project is het ontwikkelen van een meetsysteem voor de overall efficiency van ultra-efficiënte vermogenselektronica. Daarnaast zal VSL de netwerkimpact van deze systemen evalueren.

In de eerste helft van 2023 is de aanpak voor de efficiëntiemetingen ontwikkeld. De efficiëntie zal worden bepaald door zowel ingangs- als uitgangsvermogen van de vermogenselektronica nauwkeurig te meten en het verschil van die twee waarden (de verliezen) te delen door het ingangsvermogen. De

uitdaging in deze meting ligt in het feit dat voor hoge efficiëntie de verliezen klein zijn ten opzichte van ingangs- en uitgangsvermogen. Het is daarom van belang ingangs- en uitgangsvermogen zeer nauwkeurig te meten. VSL zal hiervoor gebruik maken van een gekalibreerde breedbandige vermogensmeter, eventueel aangevuld met spannings- en stroomsensoren om de hoge in- en uitgangssignalen van de vermogenselektronica te schalen naar een niveau waarop ze gemeten kunnen worden door de vermogensmeter.

Er is een enquête uitgestuurd naar drie belangrijke Nederlandse partners in het PowerizeD project om meer informatie te krijgen over de ingangs- en uitgangs-signaalniveaus van de nieuwe vermogenselektronica die door hen ontwikkeld wordt. Op basis van de reacties op de enquête zijn de specificaties (m.n. de meetbereiken) van het efficiëntiemeetsysteem bepaald. Vervolgens is het meetsysteem inclusief extra stroomsensoren besteld.

De link naar de projectwebsite is: <https://powerized.eu/>.

4.1.16 Karakterisatie van middenspanningstransformatoren tot 150 kHz (ADMIT)

Het ADMIT project is in juni gestart en zal tot en met mei 2026 lopen. VSL neemt deel aan drie werkpakketen met als voornaamste doel het ontwikkelen van een meetsysteem voor de karakterisatie van stroomtransformatoren tot 150 kHz. VSL gaat een stroomgeneratiecircuit ontwikkelen dat stromen tot 10 A bij 150 kHz kan leveren. Daarnaast zal er door VSL worden bijgedragen aan het ontwikkelen van een breedbandige spanningsverdeler.

In 2023 is het generatiecircuit onderzocht en met verschillende versterkers getest. Het doel van 20 A bij 150 kHz is nog niet gehaald. Tot nu toe is 10 A bij 150 kHz mogelijk gebleken. In 2024 worden deze tests verder uitgevoerd.

De link naar de projectwebsite is: <https://www.admit-project.eu/>.

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

Op 1 juni 2023 is het EMPIR-project e-TRENY van start gegaan, dat loopt tot en met mei 2026. VSL is betrokken bij de ontwikkeling, kalibratie en toepassing van de on-site opstellingen en algoritmes voor het meten van de energieverliezen van niet-conventionele AC/DC-onderstations en de laad-ontlaad efficiëntie van elektrische opslagsystemen.

In 2023 is er een testlocatie in Hannover geregeld. Ook is er een beschrijving van de leveringsinfrastructuur met nominaal vermogen en elektriciteitsschema's van het onderstation gemaakt. Daarnaast is er een samenvatting van de specificatie van het meetsysteem opgesteld en ter bespreking en bevestiging naar de belanghebbenden gestuurd. Het analyse-algoritme en de databasevereisten van de on-site meetsoftware zijn geanalyseerd.

4.1.18 Metrologie voor remote sensing van optische eigenschappen van aerosolen (MAPP)

Het EMPIR-project "Metrology for Aerosol Properties" (MAPP) liep van september 2020 tot en met augustus 2023. Het voornaamste doel van het project is de ontwikkeling van laboratorium- en kalibratiemethoden op locatie voor lineariteit, Field Of View (FOV) en spectrale irradiantierespons van arrayspectroradiometers in het golflengtebereik van 310 nm tot 1700 nm. Hiermee beoogt het project een metrologisch kader te scheppen voor het wereldwijde oppervlaktenetwerk SKYNET, dat de optische eigenschappen van de aerosolen meet (<https://www.skynet-isdc.org/>). Atmosferische aerosolen zijn ondergeschikte bestanddelen van de atmosfeer, maar het zijn kritische componenten in termen van effecten op het klimaat. Hun eigenschappen zijn erkend als essentiële klimaatvariabelen (ECV's) door het Global Climate Observing System (GCOS).

Door het consortium zijn twee SKYNET sky-radiometers geselecteerd, alsmede één grating-spectroradiometer van één van de stakeholders, die door VSL gekarakteriseerd werden. De kalibratiefaciliteit van VSL, gebaseerd op een verstembare laser, wordt gebruikt om de

bandpassfunctie, spectrale (ir)radiantieresponsiviteit, polarisatie, lineariteit en “stray light” matrix te meten.

Beide SKYNET instrumenten waren volledig gekalibreerd in 2021-2022. Het grootste deel van de data analyse is eind 2022-begin 2023 uitgevoerd. De lineariteit metingen zijn gedaan voor een gedeelte van het dynamische bereik vanwege de beschikbare lasers en hun vermogensbeperkingen: Het door de fabrikant opgegeven bereik voor de betreffende gekarakteriseerde kanalen is 2,5 μA . Het bereik, toegestaan door onze hardware, is 715 nA. Ook waren de lagere laservermogens de oorzaak van grotere onzekerheid. De meetresultaten kwamen echter goed overeen met de resultaten van andere partners met andere meetmethoden.

De radiometrische karakterisering van de array spectroradiometer is gedaan in twee fasen. Begin 2022 zijn de pixel-golflengterelatie, lineariteit, spectrale irradiantieresponsiviteit en spectrale stray light correctiematrix gekalibreerd. De stray light correctie is een belangrijke correctiefactor die moet worden toegepast op de aflezingen van dergelijke array-spectroradiometers, met name in het UV-gebied van het elektromagnetische spectrum, aangezien kalibratie-onzekerheden theoretisch kunnen oplopen tot 100% waar stray light niet meer te onderscheiden is van echte signalen tijdens responsiviteitskalibratie. In maart 2023 zijn metingen voor nog 4 golflengten gedaan om de stabiliteit te beoordelen en de correctiematrix voor stray light verder in te vullen. De responsiviteit van de spectrale irradiantie werd ook opnieuw gekalibreerd door de correctie van stray light toe te passen over het gehele golflengtebereik van de array-spectroradiometer. In totaal variëren de bereikte VSL-kalibratieonzekerheden ($k = 2$) in responsiviteit van meer dan 100% in het UV-gebied tot 2% tot 3% in het zichtbare gebied, zoals gepresenteerd tijdens de laatste projectbijeenkomst. Een vergelijking van de responsiviteit berekend in 2022 en 2023, toonde verschillen van 4% tot 10%. Gezien de relatief korte tijd tussen de metingen en een voldoende stabiliteitsbeoordeling was dit niet te verwachten. Met een van de stakeholders is overeengekomen dat aanvullende kalibraties zullen plaatsvinden bij zijn faciliteiten om te zoeken naar een hoofdoorzaak van dit verschil.

De link naar de projectwebsite is: <https://www.pmodwrc.ch/en/MAPP/>.

4.1.19 Metrologie voor hoge-druk gas en vloeibare waterstofflows (MetHyInfra)

CO₂-neutrale oplossingen voor transport en energie vormen een kernelement van de Europese Green Deal, waarvoor investeringen in milieuvriendelijke groene of blauwe waterstof benodigd zijn. De noodzaak van een metrologische infrastructuur voor fiscale bemetering van waterstofoverslag wordt dwingender, omdat de verhandeling toeneemt. In het EMPIR-project MetHyInfra, dat loopt van juni 2021 tot en met mei 2024, 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. VSL richt zich inhoudelijk op de vloeibare waterstofactiviteiten en coördineert de activiteiten in het bijbehorende werkpakket van het EMPIR-project (WP4).

VSL heeft een test uitgevoerd met vloeibare waterstof waarbij een Coriolismeter in serie was geplaatst met twee turbinemeters. De test is uitgevoerd met representatieve debieten die direct van toepassing zijn op de industrie (Q_{max} is ongeveer 3000 kg per uur). De herleidbaarheid door VSL is verschaft middels alternatieve vloeistofkalibraties van de Coriolismeter. De afgeschatte onzekerheid op de gebruikte (Coriolis)meter referentie is grotendeels uitgewerkt door gebruik te maken van het eerder in het project ontwikkelde Coriolismetermodel voor vloeibare waterstof flow.

Een van de Flomeko projectbijdragen is uitgewerkt en ingediend als journal paper waarin, onder andere, de eerste resultaten aangaande het voorzien van herleidbaarheid voor vloeibare waterstofflow opgenomen zijn. De rapportage volgende uit de literatuurstudie naar materiaal-eigenschappen en onzekerheidsbronnen op zeer lage temperaturen en het effect ervan op een Coriolisflowmeter gepresenteerd op de CIM 2023. Er is bijgedragen aan een journal publicatie die de meetonzekerheid bij zogenaamde temperatuurcorrectiemodellen voor Coriolismeters kwantificeert en er is gestart met de draft voor een journal publicatie aangaande behaalbare meetonzekerheid bij stroming van vloeibare waterstof op debieten die van toepassing zijn voor de industrie (Q_{max} ongeveer 3000 kg per uur).

De link naar de projectwebsite is: <https://www.methyinfra.ptb.de/the-project/>.

4.1.20 Metrologie voor waterstof (Met4H2)

Het Met4H2 project is onderdeel van het Partnership for Metrology en gestart per 1 oktober 2022. Het loopt tot en met eind september 2025. VSL is de coördinator. Het project heeft als hoofddoel het verder ontwikkelen van een meetinfrastructuur voor waterstof met de nadruk op het gebruik van waterstof in gasnetwerken. Het project sluit aan op en maakt gebruik van de resultaten van diverse projecten in het EMPIR-programma. VSL is actief in alle werkpakketten en leidt werkpakketten 1 (Health, Safety and Environment) en 6 (Management).

Diverse activiteiten zijn gestart, waaronder de bouw van een flowopstelling voor waterstof voor debietmetingen voor huishoudmeters en de doorvoering van verbeteringen aan de hogedruk dauwpuntsgenerator. Ook zijn er diverse activiteiten afgerond. In samenwerking met Gasunie is een methode voor het meten van de molfractie chloor in stikstof (en later waterstof) ontwikkeld en is de modellering van comptabele metingen en standaarden voor een zwavelvrije odorant (2-hexyn) afgerond. Voor de modellering van comptabele metingen zijn gegevens gebruikt van een van de grensstations. Uit een eerste analyse blijkt dat als tijdafhankelijke effecten worden meegenomen de onzekerheid 30 % hoger ligt dan bij de huidige, naïeve evaluatie die ervanuit gaat dat dit soort effecten er niet zijn, een belangrijk resultaat voor stakeholders.

De link naar de projectwebsite is: <https://met4h2.eu/>.

4.1.21 Metrologie voor CCUS (MetCCUS)

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 van het EPM-project MetCCUS, dat loopt van oktober 2022 tot en met september 2025, is het verrichten van onderzoek naar en het ontwikkelen van metrologische infrastructuur nodig voor CO₂-afvang, -gebruik en -opslag op industriële schaal. In het project wordt onderzoek gedaan naar de belangrijkste meetuitdagingen voor CCUS (Carbon Capture Utilization and Storage); volume metingen, emissiemetingen, chemische samenstelling en fysische eigenschappen van CO₂.

Het project wordt gecoördineerd door VSL. Binnen het project is VSL betrokken bij onderzoek naar volumemetingen, chemische samenstelling en fysische eigenschappen van CO₂. Voor volumemetingen is een eerste ontwerp gemaakt om gasvormig CO₂ te meten, zijn de voorbereidingen voor een ringvergelijk afgerond, en is gestart met een literatuurstudie naar de ontwikkelen van een primaire standaard voor vloeibaar CO₂. Voor het bepalen van de chemische samenstelling heeft VSL primaire gasstandaarden gemaakt met water, SO₂ en NO₂ als onzuiverheden in CO₂. De eerste metingen voor het bepalen van de stabiliteit van deze standaarden zijn uitgevoerd. Daarnaast worden methodes ontwikkeld om multi-component gasmengsels te maken met permanente gassen zoals zuurstof, stikstof, waterstof, methaan, koolstofmonoxide, argon en zuurstof in CO₂. Er is een start gemaakt met de analyse van de onzekerheid van de toestands-vergelijkingen voor CO₂.

De link naar de projectwebsite is: <https://metccus.eu>.

4.2 Milieu

4.2.1 Metrologie voor herleidbare kwikmetingen (SI-Hg)

Binnen verschillende EMRP- en EMPIR-projecten (“PartEmission” (2010 – 2013), “MeTra” (2013 – 2016) en “MercOx” (2016 – 2020)) is de metrologische herleidbaarheid voor gasvormig kwik naar de

SI-eenheden vastgelegd, voor zowel elementair kwik als geoxideerd kwik. Ondanks deze ontwikkelingen zijn er op dit moment geen gestandaardiseerde procedures die ervoor zorgen dat kwikmetingen herleidbaar zijn bij kalibratie- en testlaboratoria, instrumentleveranciers, meetnetwerken voor atmosferische lucht en de industrie zoals kolencentrales, afvalverbrandings-installaties en cementproducenten. In het EMPIR-project SI-Hg, dat liep van oktober 2020 tot en met september 2023, zijn wetenschappelijk verantwoorde kalibratieprocedures voor elementair- en geoxideerd-kwikgasgeneratoren ontwikkeld en gevalideerd.

In het project is een kalibratie protocol ontwikkeld voor kwikgasgeneratoren. Validatie van de protocollen is uitgevoerd door kwikgasgeneratoren, die beschikbaar zijn op de markt, te testen. Verschillende generatoren konden volgens het protocol getest worden in het project. De resultaten voor de verschillende gasgeneratoren tonen aan dat kalibratie met metrologische herleidbare standaarden noodzakelijk is om vergelijkbare resultaten te krijgen voor kwikconcentraties in de lucht en bij emissiebronnen. De ontwikkelde protocollen en validatierapporten zijn overgedragen aan de normalisatiecommissie CEN TC 264 "Luchtkwaliteit" WG8 "Metingen van totaal kwik in emissie bronnen" zodat de protocollen omgezet kunnen worden in gestandaardiseerde procedures.

VSL was coördinator van dit project. De link naar de projectwebsite is: www.si-hg.eu.

4.2.2 Metrologie voor klimaatrelevante VOC's (MetClimVOC)

Het EMPIR-project MetClimVOC, dat liep van juni 2020 tot en met mei 2023, heeft zich gericht op de ontwikkeling van een meetmethode voor het bepalen van het verlies van de OVOC-samenstelling (ook wel oxy-VOC genoemd, zuurstofhoudende Vluchtige Organische Componenten, zoals alcoholen) door adsorptie na bereiding van lage concentraties (100 – 1000 nmol/mol) gasmengsels in cilinders. Het project is per 31 mei 2023 afgerond en alle doelen zijn gehaald. De rapportage is afgerond en goedgekeurd.

De methanol adsorptiestudie door middel van twee isotopen is afgerond en een presentatie is gegeven bij de CIM2023 conferentie. Een bijbehorend artikel is ingediend bij het Measurement Science and Technology tijdschrift. Deze studie, op een kleine set cilinders, toont aan dat de adsorptie en afgifte van methanol sterk afhankelijk is van de cilinderbehandeling en evolueert in de tijd.

Ondanks diverse problemen met de meetapparatuur is het gelukt om de meetmethode te verbeteren voor wat betreft de nauwkeurigheid en reproduceerbaarheid. De stabiliteitsmetingen (tot 18 maanden) van de OVOC-referentiegasmengsels zijn uitgevoerd, evenals de berekening van de onzekerheid. De nieuwe set cilinders die in dit project is getest, toont aan dat het mogelijk is om OVOC's te bereiden op 100 nmol/mol met een initiële onzekerheid binnen 5%. De stabiliteitsstudies tonen echter een toename van acetaldehyde (ca. 7 % van de beginwaarde) en een variabele trend voor methanol (0 tot -13 % van de beginwaarde). De rol van vocht in de cilinder op de resultaten van acetaldehyde en methanol zal in de toekomst moeten worden onderzocht om de chemie achter deze resultaten te begrijpen en, waar mogelijk, te reduceren. Dit kan als klein onderdeel binnen het beheer of als toevoeging aan een nieuw research project. De resultaten zijn gepresenteerd bij de eindworkshop.

VSL heeft een rapport gemaakt met de resultaten van de bereiding van verschillende, door projectpartners geproduceerde, VOC-referentiegasmengsels, inclusief de stabiliteit en vergelijkbaarheid. Het OVOC-vergelijk voor referentiegasmengsels (VSL/LNE/METAS) heeft een goede vergelijkbaarheid aangetoond voor aceton en verschillen in resultaten voor methanol en ethanol die in de toekomst moeten worden onderzocht. Het protocol voor het bereiden van herleidbare werkstandaarden (secundair) in veldlaboratoria is opgesteld in samenwerking met EMPA en andere project-partners en de validatiemetingen zijn uitgevoerd. VSL en METAS hebben de certificering van 'whole air' (achtergrondlucht-) monsters voor resp. OVOC en terpenen uitgevoerd. De gecertificeerde waarden zijn verder gebruikt om de resultaten van de veldlaboratoria (ook projectpartners) voor dezelfde 'whole air' monsters te beoordelen. Een rapport is gemaakt en de resultaten zijn gepresenteerd bij de eindworkshop.

De link naar de projectwebsite is: <http://www.metclimvoc.eu/>.

4.2.3 Metrologie voor Portable Emission Measurement Systems (MetroPEMPS)

Het EMPIR-project MetroPEMS, dat liep van september 2020 tot en met augustus 2023, richtte zich op ontwikkelen van (I) kalibratiemethoden voor Portable Emission Measurement Systems (PEMS) en (II) Real Driving Emission (RDE) typegoedkeurmethoden die voldoen aan de bestaande en toekomstige wijzigingen in de RDE-wetgeving.

Mengsels met een hoge concentratie NO₂ (500-2500 µmol/mol) zijn gemaakt en gemeten met de nieuwe FTIR (Fourier Transform Infrared Spectrometer). Tevens zijn een aantal multi-component mengsels gemaakt (NO en NO₂ in combinatie met hoge concentraties CO en CO₂). De stabiliteit van de mengsels is gevolgd over een periode van meer dan 12 maanden. Alle mengsels bleken stabiel. Met dezelfde techniek zijn methoden ontwikkeld om onzuiverheden zoals N₂O₄ en HNO₃ te identificeren en te kwantificeren. De gemeten N₂O₄-fractie komt goed overeen met berekeningen van zowel VSL als projectpartner Air Liquide. Temperatuur- en drukafhankelijkheid van de relatieve hoeveelheden van de relevante onzuiverheden zijn bepaald.

Voor sommige onzuiverheden, zoals bijvoorbeeld HNO₂ en HNO₃, zijn geen gravimetrische standaarden mogelijk, waarbij dan voor de kwantificering gebruikt is gemaakt van de absorptie cross-sectie of relatieve lijnsterkte uit de literatuur. Binnen het project zijn de meest betrouwbare datasets uit de literatuur geïdentificeerd en geverifieerd.

Alle deliverables en rapportages zijn afgerond. Met name de opgedane ervaring in het meten met de FTIR en de kennis van het NO₂ versus N₂O₄ evenwicht zijn goud waard voor het behoud van de topositie die VSL inneemt op het gebied van NO₂ referentiematerialen.

Artikelen over de ontwikkeling van de meetstandaarden voor PEMS zijn gepubliceerd op LinkedIn (VSL, MetroPEMS en PEMS groepen) en de VSL-website.

De onderzoeksresultaten met betrekking tot de PEMS EFM (Exhaust Flow Meter) zijn ingediend als journal publicatie en bijbehorende aanbevelingen ter verbetering van het karakteriseren van de meetonzekerheid van de EFM zijn in een technische paneldiscussie alsmede in een finale workshop met stakeholders bediscussieerd.

De link naar de projectwebsite is: <https://www.metropems.ptb.de/home/>.

4.2.4 Emissies van gevaarlijke stoffen uit bouwmaterialen in binnenlucht (MetriAQ)

Producten zoals bouwmaterialen en meubilair stoten VOC's (Vluchtige Organische Componenten) uit die alomverteenwoordigd zijn in binnenlucht. Deze stoffen veroorzaken irritatie aan de zintuigen en gezondheidsklachten. Europeanen spenderen 80% of meer van hun tijd binnen, dus is een gezonde binnenlucht essentieel. Dit kan worden bereikt door het controleren van emissiebronnen en door het elimineren of beperken van de emissie van VOC's 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 (CRM) beschikbaar.

Het EMPIR-project MetriAQ is van start gegaan op 1 juni 2021 en loopt tot en met mei 2024. VSL heeft Primaire Referentie Materialen (PRM's) en gecertificeerde gasmengsels (CGM's) ontwikkeld met acht verschillende VOC's in lucht of stikstof. Op basis van EN16516 is een analysemethode ontwikkeld om de PRM en CGM te kunnen analyseren en de stabiliteit te bepalen. De stabiliteit van de PRM is gedurende 18 maanden gevolgd. Daarnaast wordt een nieuwe methode, inclusief speciale set-up, ontwikkeld om een PRM met formaldehyde in stikstof te maken. De optimale temperatuur voor het gebruik van de set-up is bepaald en in 2024 zullen de eerste mengsels in cilinders worden gemaakt.

De link naar de projectwebsite is: <https://www.bam.de/Content/EN/Projects/MetriAQ/metriAQ.html>.

4.2.5 Emissie van ammoniak in de veehouderij (QuantiAGREMI)

Het EPM-project ‘On farm quantification of ammonia and greenhouse gas emissions from livestock production’ (quantiAGREMI) is gestart per 1 november 2022 en loopt tot en met oktober 2025.

Voor het ontwerp van het ammoniakverdundingssysteem is overleg geweest met TNO over de gewenste specificaties, zodat zoveel mogelijk van de (zeven verschillende) TNO ammoniakmeetsystemen kunnen worden gekalibreerd in het veld. Het ontwerp is aangepast en afgerond en de onderdelen zijn inmiddels allemaal binnen. Er is begonnen met de testen van diverse onderdelen en het ontwikkelen van de software. Op de Fenelab labdag is een tweetal presentaties gehouden over VSL activiteiten binnen dit project. Tevens is er een bezoek gebracht aan Wageningen Livestock Research in Wageningen voor overleg.

VSL is gestart met de ontwikkeling van een mathematisch model voor gasdispersie in koeienstallen. Hiervoor is input van TNO en Universiteit Wageningen gebruikt.

De project website is <https://www.lgcgroup.com/our-programmes/metpart-quantiagremit/>.

4.3 Gezondheid

4.3.1 Radiometrie voor fotobiologische veiligheid

Het doel van het project “Radiometrie voor fotobiologische veiligheid”, dat liep van 2021 tot en met 2023, was het ontwikkelen een opstelling voor herleidbare metingen van radiantie en irradiantie van lichtbronnen die voldoende is om vast te stellen of aan de, in de norm voor fotobiologische veiligheid vastgelegde, blootstellingslimieten wordt voldaan.

Het ontwerp van de opstelling is gemaakt en de opbouw van de opstelling is gestart in mei 2022. Een stagiair heeft de theoretische literatuur en de hardwarespecificaties bestudeerd. Een testopstelling en initiële metingen zijn gerealiseerd met verschillende “dummy” lampen om verschillende opties van opstelling te testen voor oktober 2022. De eerste validatie werd ook gedaan. De primaire versie van een analyse script voor alle methoden werd gerealiseerd en is nu aangepast voor een betere gebruikersinterface. Scripts zijn nu beschikbaar voor kalibraties van en met de opstelling. Validatie en analyse templates werden opgesteld ter voorbereiding op een audit en accreditatie. De meetprocedure is nu ook gedeeltelijk geautomatiseerd.

Onderdelen van de fotobiologische veiligheidsopstelling zullen tevens gekalibreerd worden om de herleidbaarheid te kunnen realiseren. Deze kalibraties zijn gedaan en de gegevensanalyses maakten het mogelijk om eerste schattingen van het onzekerheidsbudget te krijgen. Er werden alternatieve manieren van kalibreren voorgesteld om de doorlooptijd van de kalibratie te versnellen. Tegelijkertijd is hierbij rekening gehouden met de beschikbaarheid van apparatuur/personeel voor de toekomst en ook voor de vereenvoudiging van gegevensanalyses. De eerste versie van werkinstructies is ook inmiddels vastgesteld. Een metroloog is getraind voor het uitvoeren van radiantie/irradiantie metingen.

Vanwege de beperkte beschikbaarheid van personeel en laboratoriumapparatuur is het project verlengd tot 2023. De setup is in het begin van 2023 en eind 2023 gekalibreerd op golflengte en irradiantie, waarbij de irradiantie eind 2023 een afwijking liet zien ten opzichte van begin 2023. Radiantie kalibraties zijn nog niet herleidbaar door het technische problemen met de laser. De EKSPALA laser wordt begin 2024 gerepareerd. Er wordt gekeken hoe de restpunten kunnen worden opgepakt in 2024.

4.3.2 Metrologie voor ‘Temporal Light Modulation’ (MetTLM)

Doel voor VSL is om met het MetTLM EMPIR-project een internationaal leidende rol te verwerven op gebied van metrologie voor ‘Temporal Light Modulation’ (TLM). VSL is hiervoor goed gepositioneerd als een van de weinige NMI’s die op dit moment flicker-meters kalibreren en is actief betrokken bij de CIE. Naast het doorontwikkelen van diensten voor TLM, kan VSL als coördinator een sturende bijdrage leveren aan het opstellen van guidelines/recommendations voor de CIE en ander stakeholders.

Dit project is op 1 mei 2021 gestart en loopt tot eind april 2024. In 2022 is er verder gewerkt aan de implementatie en validatie van de modellen voor short term flicker (de zogenaamde PstLM-waarde) en het stroboscopisch effect (Stroboscopic Visibility Measure, SVM). Met de binnen het project in 2021 ontwikkelde software zijn metingen uitgevoerd voor karakterisatie van een aantal commerciële TLM-meetinstrumenten. Tevens is een serie validatiemetingen uitgevoerd aan een referentiebron voor TLM, die door een van de projectpartners ter beschikking is gesteld aan VSL. VSL heeft een presentatie gegeven over het meten van TLM op een, mede door VSL, georganiseerde workshop van de CIE, in Athene. Aansluitend aan de workshop is een bijeenkomst gehouden met een kleine 50 stakeholders. Een publicatie over de faciliteit voor karakterisatie van fotometers voor TLM metingen is na peer-review geaccepteerd voor publicatie in het tijdschrift *Lighting Research & Technology*.

Binnen het consortium is voorrang gegeven aan het uitvoeren van de metingen waardoor de draft van de Good practice guide voor kalibratie en karakterisatie van TLM-apparaten is vertraagd. Het protocol voor de ringvergelijking is opgesteld en de eerste metingen zijn uitgevoerd. Daarnaast is er ook nog een TLM meter gekalibreerd en er is een draft klaar voor een wetenschappelijke publicatie over de kalibratie van TLM meters.

Er is contact gelegd met verschillende nationale en internationale stakeholders waaronder CIE en LIGHTNING EUROPE op het gebied van flicker metingen en TLM-metrologie.

De link naar de projectwebsite is: <https://www.mettlm.eu/>.

4.3.3 Metrologie voor draagbare lichtloggers en optische dosismeter (MeLiDos)

Licht en verlichting hebben een grote 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 meerkanaals 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.

Het EPM-project is in juni 2023 van start gegaan en loopt tot en met mei 2026. Er is een literatuurstudie naar de verschillende werkingsprincipes van lichtloggers en beschikbare karakterisatiemethodes afgerond en er is een begin gemaakt met het geschikt maken van de faciliteit voor het meten van spectrale responsiviteit voor het meten aan lichtloggers

De link naar de projectwebsite is : <https://www.melidos.eu/>.

4.3.4 Herleidbaarheid voor röntgendiagnostiek (TraMeXi)

Dit project is op 1 juni gestart en loopt tot en met mei 2026. Dit project heeft als doel een bijdrage te 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.

Voorlopig zijn er vooral voorbereidende werkzaamheden uitgevoerd: Er zijn enquêtes uitgevoerd waarbij voldoende response is ontvangen. Ook is er een draft versie van het protocol voor het uit te voeren comparison opgestart.

Website van het project: <https://tramexi.com/>.

4.4 Geavanceerde elektronica

4.4.1 Metrologie voor watersporen in ultrapure gassen (PROMETH2O)

Binnen diverse takken van de industrie, zoals gas- en halfgeleiderindustrie, is het belangrijk dat in bepaalde processen weinig vocht aanwezig is (laag $\mu\text{mol/mol}$ 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. NO_2 en HCl), waarvan de stabiliteit wordt beperkt 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 het EMPIR-project PROMETH2O worden ontwikkeld. Het project is gestart op 1 juni 2021 en loopt tot en met eind mei 2024.

In het kader van thermometrie worden de zogenaamde “enhancement factors” van waterdamp in de matrixgassen N_2 en Ar bij verschillende drukken bepaald. Het gerealiseerde dauwpunt wordt bepaald door een “chilled mirror hygrometer” (CMH) bij atmosferische druk (geëxpandeerd) of onder dezelfde druk als de dauwpuntsgenerator. De resultaten worden vergeleken met literatuurwaarden om de experimentele methode te valideren en de nauwkeurigheid van de generator te kunnen bepalen. Het project heeft herhaaldelijk vertraging opgelopen door personeelstekort en -doorstroom en het defect raken van het thermostaatbad van de primaire vochtgenerator. De reparatie van het bad is inmiddels voltooid en het project heeft weer een thermostaatbad ter beschikking waarmee in 2023 twee datasets zijn gemeten bij de vriespunten -30 °C t/m -70 °C , met een druk van 1 MPa voor beide stikstof en argon als draaggas. Het Data Science and Modeling team is ingeschakeld om samen met Thermometrie de onzekerheden van de enhancement factor verhoudingen te bepalen. De datasets zijn van een voldoende kwaliteit en de onzekerheden zijn laag genoeg om de nieuwe correlatie functies, die door andere projectpartners zijn ontwikkeld, herleidbaar te valideren tot -70 °C .

Tevens is er een parallelle weg ingeslagen om de enhancement factors te bepalen met behulp van spectroscopische middelen zoals Tunable Diode Laser Spectroscopy (TDLS). De opstelling zal als transfer standaard kunnen fungeren en zo de herleidbaarheid van vochtmetingen binnen VSL versterken. De opstelling is gebouwd en de meetsoftware is gereed. Om de deadline te halen voor de metingen van de enhancementfactoren, hebben de werkzaamheden aan de TDLS uiteindelijk minder prioriteit gekregen en staan voor 2024 in het werkplan.

Voor de magnetische suspensiebalans is een ontwerp gemaakt voor een metalen kamer met minder aansluitingen dan de bestaande glazen kamer, waardoor de kans op inlek van vocht wordt verminderd. De kamer is inmiddels gebouwd en de eerste testen zijn verricht. Ook is er een nieuw filter besteld, dat volgens de specificatie vocht uit de inkomende gasstroom verwijdert tot op minder dan 1 ppb. Door een storing in de magnetische suspensiebalans is er vertraging ontstaan in de werkzaamheden. Samen met de fabrikant van de balans is gezocht naar de oorzaak van de storing. Er is besloten om een deel van de balans te vervangen, mede omdat de software alleen onder Windows XP kon draaien. Eind 2022, is het systeem door de fabrikant geüpgraded. Na kalibratie van de temperatuursensor trad er een storing en is de balans terug gestuurd naar de leverancier voor reparatie. Bij installatie na de reparatie trad dezelfde storing weer op, maar deze is inmiddels verholpen door de fabrikant.

Er zijn twee filters voor H_2O getest waarbij het nieuwe filter iets beter presteert dan het oude filter. Hierna zijn er metingen gedaan met de glazen permeatiekamer. De resultaten zien er goed uit, maar het achtergrondniveau door inlek is zoals verwacht vrij hoog (en daardoor is deze configuratie niet geschikt voor het genereren van hele lage H_2O fracties). Hierna is begonnen met metingen met de metalen permeatiekamer. Deze laat duidelijk minder inlek zien. Werk met deze kamer is nog gaande. Door de diverse storingen is het werk vertraagd.

De link naar de project website is <https://www.prometh2o.eu/>.

4.4.2 HF-metrologie voor toekomstige communicatiebehoeften (FutureCom)

In het EMPIR-project FutureCom, dat loopt van september 2021 tot en met augustus 2024, wordt gewerkt aan HF-metrologie voor toekomstige communicatiebehoeften. Europese fabrikanten van telecommunicatieapparatuur, telecomoperators en regelgevers worden geconfronteerd met steeds hogere eisen van klanten op het gebied van datasnelheden en energieverbruik. Hogere datasnelheden vertalen zich in hogere frequenties voor versterkers, geïntegreerde schakelingen en printplaten. Met niet-lineaire componenten kan voor dit soort toepassingen een lager energieverbruik worden bereikt.

Een belangrijk initiatief in dit project is de ontwikkeling van meetmogelijkheden, waarmee apparaten en systemen elektrisch kunnen worden getest onder realistische (d.w.z. eindgebruikers) bedrijfsomstandigheden, inclusief geschikte omgevingsomstandigheden. De inbreng van VSL concentreert zich op het realiseren van herleidbare kalibratietechnieken geschikt voor actieve niet-lineaire componenten. Hierbij wordt een conventioneel Vector Network Analyzer (VNA) meetsysteem uitgebreid naar een zogenaamd load-pull systeem, zodat actieve componenten onder realistische omstandigheden gekalibreerd kunnen worden.

De eerste EM-veldsimulaties voor het bepalen van referentiewaarden van on-wafer kalibratiestandaarden zijn inmiddels uitgevoerd. Hierbij zijn zowel enkellaagse als meerlaagse referentiewafers gebruikt. Deze geven inzicht in de kalibratienauwkeurigheid, die haalbaar is op complexe meerlaagse referentiewafers.

Er is een methode ontwikkeld om een zogenaamd “behavioral model” van een vector modulator te ontwikkelen. Deze methode stelt in staat om meetonzekerheden voortkomend uit DC I/Q signalen door te berekenen naar impedantiewaarden van de tuner, waarin de vector modulator een cruciale component vormt. Er is uitgebreide meetsoftware ontwikkeld voor het synchroon aansturen van een de diverse HF-apparaten.

De vermogenskalibratie van de VNA meetontvangers is uitgevoerd en gevalideerd. Hierbij zijn ook de meetonzekerheden van de nieuwe meetmethode bepaald. Eerste resultaten van dit onderzoek zijn in een wetenschappelijke publicatie gepresenteerd. Tevens is een opzet gemaakt van meetsoftware benodigd voor automatische load-pull kalibraties. Hierbij wordt er automatisch het ingangsvermogen van het apparaat berekend en aangestuurd tot de gewenste waarde.

In de eerste helft van 2023 is gewerkt aan de opbouw en verbetering van de installatie. Zo is het probing station opgebouwd en getest voor on-wafer metingen. Ook is de aansturingsoftware voor het probing station aangepast en gevalideerd voor automatisch contacteren van on-wafer componenten. Daarnaast is er een concept ontwerp gemaakt voor een nieuw probing station met een verhoogde nauwkeurigheid van de benodigde translaties. Het on-wafer meetsysteem wordt gebruikt voor het testen van Impedance Standard Substrate (ISS) wafers voor en na de temperatuurcyclus tests. Hierbij is de invloed van verouderingsproces op de meetresultaten van de wafers onderzocht. De eerste resultaten zijn tijdens een project workshop gepresenteerd, en worden ook in een wetenschappelijke publicatie gepresenteerd.

Ook is een load-pull meetsysteem opgebouwd, waarvan de meetsoftware is ontwikkeld. Deze is in staat om S-parameters van actieve componenten te meten onder verschillende load impedanties. Hierbij zijn verschillende testen uitgevoerd voor onderzoek naar diverse onzekerheidsbronnen. Zo blijken correctiewaarden gevoelig voor het ingestelde uitgangsvermogen van de VNA. Daarnaast produceren actieve tuners veel meer ruis dan tot op heden werd aangenomen. Deze inzichten hebben geleid tot het verbeteren van de onzekerheidsanalyse voor load-pull systemen.

De resultaten van de diverse activiteiten worden opgenomen in de Good Practice Guide voor de industrie. Hiervan is de opzet gemaakt en resultaten worden geleidelijk opgenomen in het document.

De link naar de project website is <http://www.futurecom.unicas.it>.

4.4.3 Metrologie voor nanowire energy harvesting devices (NanoWires)

Het EMPIR-project NanoWires is 1 september 2020 gestart en liep tot en met augustus 2023. Energieopwekking d.m.v. duurzame bronnen (zon en beweging) vormt een oplossing voor het creëren van kleine hoeveelheden energie voor toepassingen die moeilijk bereikbaar zijn. Systemen gebaseerd op nanowires hebben bemoedigende voortgang geboekt, maar de metrologische karakterisering van de nanometercomponenten samen met de grote oppervlakken zijn uitdagend. Hoewel het globale gedrag kan worden gemeten, mist de correlatie met de eigenschappen van de individuele nanowires. Dit project was erop gericht om metrologie te ontwikkelen voor kwaliteitsmanagement van nanowire-energieopwekkingssystemen.

De project kick-off meeting is in 2020 gehouden. In 2021 zijn diverse virtuele projectbijeenkomsten georganiseerd en is de ontwikkeling van analysetools voor de evaluatie van meetdata voortgezet, inclusief het uitbreiden van de reconstructiesoftware voor nanostructuren gemeten met scatterometrie.

De eerste nanowire samples zijn door de consortiumpartners aangeleverd en door VSL gekarakteriseerd met de Atomic Force Microscoop (AFM). Deze informatie is met de consortiumpartners besproken en is gebruikt om de samplestructuur te verbeteren, zodat de samples ook met de scatterometer kunnen worden gemeten.

In de eerste helft van 2022 is de scatterometer uitgerust met optische componenten zoals microscoop objectieven en polarizers en filters om golflengtegebieden te kunnen selecteren uit het door een super-continuümlaser gegenereerde breedbandig spectrum (400-2000 nm). Daarnaast zijn componenten geïnstalleerd om de uitlijning van samples nauwkeurig te kunnen uitvoeren. In 2022 zijn nieuwe samples beschikbaar gekomen, die zowel met de AFM als met de scatterometer zijn gemeten. Ondanks de meer geordende structuur van de samples is het meetsignaal van de scatterometer nog niet optimaal. Op basis daarvan zijn acties in gang gezet voor verdere verbeteringen in het productieproces van de samples en in de focusering van de scatterometer.

In 2023 is gemeten aan nieuwe, hoge kwaliteit samples met zowel AFM als met de scatterometer. Hierover is een joint publicatie met de TU Braunschweig LENA en het Deense NMI ingediend bij "Measurement Science & Technology". Twee projectpartners hebben samples aangeleverd gebaseerd op twee verschillende fabricage methodes. Beide samples zijn gemeten met zowel gemeten met de AFM en de scatterometer. Na de metingen bleek dat een van de sampletypes niet geschikt was om te meten met scatterometrie door een te hoge oppervlakteruwheid. Het andere sample was geschikt voor metingen door de hoge uniformiteit van de samples. Het onderzoek naar de karakteristiek van de samples en de resultaten hiervan met hybride metrologie (scatterometer, AFM, SEM) zijn gepresenteerd op het internationale metrologie congres CIM 2023.

De laatste projectvergadering werd georganiseerd bij PTB, Braunschweig. Deze vergadering werd opgevolgd door de stakeholdervergadering. In beide bijeenkomsten presenteerde het consortium gefabriceerde samples, onderzoeksresultaten en ontwikkelde meet- en dataverwerkingsmethoden. VSL is, als leider van het werkpakket, verantwoordelijk voor herleidbare karakterisering, en heeft laten zien afhankelijk van de sample-eigenschappen succesvol nanowire-metingen uit te kunnen voeren door AFM en scatterometrie. Na de laatste M36-vergadering werd het project afgerond door de definitieve projectrapportage af te ronden die nu is goedgekeurd.

De website voor het project is: <https://www.ptb.de/empir2020/nanowires/home>.

4.4.4 HF-metrologie voor supergeleidende quantumcircuits

De vooruitgang van quantumtechnologieën en quantumcomputers impliceert een aanzienlijke toename van hoogfrequente componenten en kabels die worden gebruikt bij cryogene temperaturen tot tientallen millikelvin. Het opschalen van quantumcomputers stelt hoge eisen aan warmtebelasting, ruimte en signaalintegriteit onder deze extreme omstandigheden. Toch bestaat er vandaag de dag geen gevestigde technologie die nauwkeurige golfvormgeneratie en signaalmetrologie ter plaatse, onder cryogene temperaturen, kan uitvoeren. In dit project, dat loopt van 2021 tot en met 2024, worden nieuwe

microgolfmetrologie-instrumenten voor cryogene werking voorgesteld, sommige zelfs tot mK-temperaturen. Op dit gebied zal nauw worden samengewerkt met de TU Delft.

VSL concentreert zich op het realiseren van s-parameterkalibratie in een cryogene omgeving en het onderzoeken van de effecten van kabels, wanneer deze aan grote temperatuurverschillen blootgesteld worden. Het project zou in de tweede helft van 2021 van start gaan. Door krappe personele capaciteit en het nog niet kunnen vinden van een geschikte student (stagiair) is de effectieve projectstart verschoven naar het laatste kwartaal van 2022. In 2023 is een student begonnen met het modelleren van kalibratiestandaarden. Vervolgens zijn de standaarden, geleverd door de TU Delft, gekalibreerd en gevalideerd met de VSL S-parameter meetfaciliteit voor 3.5 mm connectoren. Ook zijn coaxiaal connectoren, 1-naar-6 poort, gekarakteriseerd voor gebruik in cryogene omgeving. Deze zijn nodig voor het realiseren van een VNA-kalibraties in een cryogene omgeving. Gebruikmakend van deze kalibratie standaarden en coaxiaal schakelaars, wordt een test-opstelling ontwikkeld voor VNA-kalibraties in – 196 graden d.m.v. vloeibaar stikstof. Ontwerp van het opstelling and aansturingselektronica is afgerond en deze wordt begin 2024 geassembleerd.

Daarnaast is er onderzoek uitgevoerd naar het bepalen van referentiewaarden van on-wafer kalibratie standaarden in cryogene temperaturen. Hierbij is een commerciële wafer gebruikt die is gemeten bij aantal temperaturen, van laboratoriumomgeving tot mK. Eerste resultaten van dit onderzoek zijn inmiddels ingediend bij IMS-2023 voor publicatie.

4.4.5 Hybride 4D-fabricagemethode (AMPERE)

Het PENTA-project “Hybride 4D-fabricagemethoden” (AMPERE), dat loopt van 2021 tot en met 2024, is het vervolgproject van het in 2020 succesvol afgeronde “Hybride 3D-fabricagemethoden” (Hyb-Man). Voor de flexibele productie van complexe, geïntegreerde systemen is de ontwikkeling nodig van een hybride 3D-fabricagemethode. Hierbij zal voornamelijk gebruik worden gemaakt van een additieve fabricagetechniek (3D-printing) in combinatie met de benodigde assemblage- en integratietechnieken voor de geproduceerde elektronica. De elektronische functionaliteit is hierbij in hoge mate afhankelijk van de kwaliteit van de eveneens geprinte geleidende sporen. Deze hybride fabricagetechnologie wordt ook wel 4D-printing genoemd. In dit vervolgproject zal de nadruk liggen op onderzoek naar en ontwikkeling van miniaturisatie en robuustheid van 4D-printing technologie. Een integraal onderdeel van deze processen is het meten en testen van producten tijdens het fabricageproces, zodat het gewenste product in één keer accuraat wordt gefabriceerd.

De kick-off is in maart 2021 gehouden en in de eerste fase van het project is de metrologiebehoefte geïnventariseerd en zijn de gebruikersspecificaties en de schaalbare proces- (rand)voorwaarden bepaald.

Vanuit metrologisch oogpunt is de nauwkeurigheid van de printmachines zelf een belangrijke factor in de nauwkeurigheid waarmee de geprinte producten kunnen worden vervaardigd. Dat zal dan ook worden vastgesteld door kalibratie van de bewegingsassen van de printmachines. Metingen aan het printstelsel van een partner zijn in het najaar van 2022 uitgevoerd waarbij is vastgesteld dat de reproduceerbaarheid veel beter was dan de positioneringsnauwkeurigheid. Dit biedt de mogelijkheid om de afwijkingen van dit systeem aanzienlijk te verbeteren en daarmee de nauwkeurigheid te optimaliseren. Daarnaast is bij de inventarisatie gebleken dat het aanbrengen van de geprinte geleidende sporen en de nabehandeling hiervan (curing) kwaliteitkritische en tijdkritische factoren zijn. Metrologie voor de karakterisering van de geleiding en optimalisatie van het curing proces zal verder worden onderzocht.

In het begin van 2023 is een tijdelijke meetopstelling met confocale afstandssensor gerealiseerd om 3D geprinte samples te meten. Door de hoge ruwheid en transparantie van de samples wordt geen licht gereflecteerd waardoor deze metingen niet uitgevoerd kunnen worden. In de loop van 2023 is de opstelling aangepast waardoor verkennende metingen mogelijk werden gemaakt. De confocale afstandssensor is geen standaardcomponent voor de Zeiss CMM dus hier is een maatwerkoplossing voor ontworpen en gerealiseerd. Deze nieuwe oplossing maakt het mogelijk om geprinte testsamples te kunnen monteren en meten. Eind 2023 is er samen met een van de projectpartners een plan van aanpak gemaakt voor het beantwoorden van onderzoeksvragen met betrekking tot de werking van deze

confocale afstandssensor die is toegepast in een van de 3D-printers. Dit plan zal verder in 2024 worden uitgevoerd.

De 3D-printer bij een projectpartner is gekalibreerd, nadat deze printer is verbeterd. De positionauwkeurigheid is verbeterd, maar temperatuur heeft grote invloed op de meetresultaten. Temperatuurstabiliteit zal meegenomen worden bij verdere verbetering van de 3D-printer.

De website voor het project is: <https://penta-eureka.eu/project-overview/penta-call-5/ampere/>.

4.4.6 De grenzen van optische nanodimensionele metrologie verleggen (POLight)

Innovatieve batterijen en sensoren, geheugens met hoge capaciteit, nieuw textiel, geavanceerde vrijetijds- en gezondheidsproducten vertrouwen allemaal op ons vermogen om materie op nanoschaal te vormen. In dit verband spelen optische meetmethoden een belangrijke rol, aangezien de ontwikkeling van vier van de zes sleuteltechnologieën die door de EU zijn geïdentificeerd (namelijk nanotechnologie, micro-nano-elektronica, fotonica en geavanceerde materialen) sterk worden ondersteund door op optica gebaseerde meetmethoden.

Er wordt nu een 'metrologiekloof' bereikt, omdat de huidige metrologiemethoden, die strategisch instrumenteel zijn voor deze KET (Key Enabling Technologies), niet in staat zijn de beoogde technologische vooruitgang te ondersteunen. In het EMPIR-project POLight, dat loopt van september 2021 tot en met augustus 2024, nemen NMI's de uitdaging aan om voorop te lopen met het ontwikkelen van nieuwe methoden om genoemde kloof te overbruggen. VSL werkt hierin aan de ontwikkeling van een scatterometer met ruimtelijke lichtmodulatie en onderzoekt de mogelijkheid om de reconstructie van de sample parameters te verbeteren door een nieuw type belichting.

Specificaties van referentiematerialen zijn samen gedefinieerd, waarbij het type structuur, en materiaalsoort, afmeting en vorm ervan zijn besproken om het beste te halen uit de meetmethode en inverse algoritmes. De hyperspectrale coherente scatterometer wordt verbeterd met een high NA (Numerical Aperture) microscoopobjectief. Het ontwerp van de sample stage is aangepast om de focus op de samples te verbeteren. De samenwerking tussen VSL en DMF resulteerde in verbeterd RCWA (Rigorous Coupled Wave Analysis)-algoritme voor het verkrijgen van de nanostructuur parameter. Partner ICFO heeft VSL bezocht om het vormen van de lichtbundel te bekijken. VSL heeft ICFO bezocht, de opstellingen van beide partners zijn vergeleken en een samenwerking is opgezet voor spatial light modulatie activiteiten binnen het project.

De consortiumpartners hebben de sampleparameters geselecteerd om metingen uit te voeren en de resultaten van verschillende optische technieken te vergelijken. Hiervoor vindt er regelmatig overleg plaats tussen de projectpartners. Samen met DFM heeft VSL een presentatie over virtuele microscopie tijdens de jaarlijkse bijeenkomst van de European Optical Society 2022 gegeven. De opstelling met spatiale lichtmodulatoren (SLM's) is in ontwikkeling. Een tussentijdse bevinding is dat de lichtvorming een invloed heeft op het diffractiepatroon in het Fourier-vlak. Een tip/tilt- en z-piëzo-stage is gekocht en gekalibreerd en zal worden gebruikt in de SLM-opstelling om een betere focus te bereiken en de gegevenskwaliteit te verbeteren. TU Delft bezocht met een promovendus en postdoctoraal onderzoeker de opstelling bij VSL. Dit resulteerde in een samenwerking met deze twee personen en een evaluatie van de opstelling waarbij er voorlopige data-acquisitie is gedaan.

In 2023 is de samenwerking met TU Delft voortgezet en is de de hyperspectrale scatterometer verbeterd door het vervangen van de laserbron door een 632 nm Thorlabs laser. Hierdoor was het nodig om de opstelling opnieuw uit te lijnen. Helaas bleek ook de vervangende laserbron uiteindelijk niet aan de gestelde eisen voor de bandbreedte te voldoen. In 2024 zal verder worden onderzocht of hier nog een vervangende laser voor kan worden gevonden. Twee abstracts zijn ingediend bij de internationale conferentie "Macro meets Nano in measurement for diagnostics, optimization and control".

VSL is beloond met een Research Mobility Grant (RMG) voor het onderzoek naar microscoopobjectieven in samenwerking met het Deense Metrologie instituut DFM. Dit onderzoek duurde 2 maanden en is uitgevoerd bij DFM. Het doel van deze RMG was om verschillende microscoopobjectieven te vergelijken die worden gebruikt in DFM (Deens Nationaal Metrologisch

Instituut) en VSL om de meest geschikte optie toe te passen voor specifieke far-field verlichting - far-field detectie optische methoden, inclusief diffractiegebaseerde niet-beeldvormende technieken zoals coherente Fourier-scatterometrie, incoherente scatterometrie en microscopie. In nauwe samenwerking met DFM zijn nieuwe kalibratietechnieken voor microscoopobjectieven ontwikkeld. Deze ontwikkelde technieken helpen de onzekerheid te verminderen en kunnen worden toegepast voor verschillende microscoopobjectieven voor de kalibratie van numerieke apertuur.

De link naar de projectwebsite is: <https://www.ptb.de/empir2021/polight/home/>.

4.4.7 Herleidbare dimensionele metingen voor de industrie gebruikmakend van optische microscopie (TracOptic)

Optische meetsystemen zijn wijdverbreid in gebruik in de dimensionele metrologie. Optische metingen zijn snel, met een relatief hoge resolutie, contactloos en dus niet invasief. Optische metingen zijn echter veelal nog niet herleidbaar door de complexe relatie tussen meetobject en meetstelsel. Het EMPIR-project TracOptic onderzoekt de herleidbaarheid van de optische metingen en wil deze onderbouwen door een uitgebreide karakterisering van het meetstelsel en validatie van de software en meetprocedures. VSL zal in dit project de zelfgebouwde hyper-spectrale scatterometer gereedmaken voor herleidbare dimensionele metingen aan geselecteerde structuren met grotere afmetingen, van enkele micrometers tot tientallen millimeters.

Het project is op 1 juni 2021 gestart d.m.v. een virtuele kick-off meeting. Er is een begin gemaakt met het karakteriseren van de afhankelijkheden van hardware, software en meetprocedure van de zelfgebouwde hyperspectrale scatterometer voor dimensionele metingen.

Voor de karakterisering van de instrumentatie, die in het consortium wordt gebruikt, is een groot aantal artefacten geselecteerd waarmee de grenzen van de meetmogelijkheden zullen worden bepaald. Het gaat hierbij o.a. om het vaststellen van de maximale helling van oppervlaktestructuren, de laterale resolutie, de meetruis en de lichtverstrooiingsfunctie.

In de eerste helft van 2022 is de scatterometer verder voorbereid om de metingen voor dit project uit te kunnen voeren. Tevens zijn met de AFM metingen gedaan op samples met een oppervlaktestructuur die als referentiewaarden gebruikt zullen worden.

In de loop van 2022 organiseerde het consortium een vergelijking en werden er meerdere artefacten verspreid. Sommige artefacten konden echter vanwege hun geometrische parameters niet worden gemeten op de scatterometer. De nieuwe sample stage die in samenwerking met het POLight project wordt ontwikkeld voor de scatterometer is bedoeld om hier verbetering in brengen.

In de 2023 is de kalibratie van de tip/tilt en Z piezo stages afgerond. De eigenschappen van de microscoop op de scatterometer wijken af van de specificaties in het meetprotocol van het project. Hierdoor konden de samples niet gemeten worden volgens de meetmethode die de andere projectpartners gebruikt hebben. Binnen het project is afgesproken dat VSL wacht op het afronden van de metingen aan de samples door de andere projectpartners.

Medio 2023 is het deelproject met betrekking tot industriële bewerkte oppervlakten gestart waarbij oppervlakte metingen door de projectpartners worden uitgevoerd op LEGO blokjes. VSL heeft een protocol geschreven voor de deelnemende partners en 5 sets met LEGO blokjes zijn verspreid in de zomer van 2023. De projectpartners hebben gedurende enkele maanden ieder de data en een analyse rapport opgeleverd.

De website is: <https://www.ptb.de/empir2021/tracoptic/home/>.

4.4.8 Herleidbare optische constanten en nanolaagjes (ATMOC)

De volgende generatie materialen en ultradunne laagjes met op maat gemaakte optische eigenschappen voor chips, zijn afhankelijk van innovaties in de nanotechnologie. Kennis van deze eigenschappen is essentieel voor innovaties, die afhankelijk zijn van materiaalparameters, die op hun

beurt weer afhankelijk zijn van de grootte van het materiaal, waarbij quantumeffecten een steeds grotere rol spelen. Voor optische meetmethodes in het golflengtebereik van zachte röntgenstraling tot infrarood, die de theoretische limieten benaderen, is betere herleidbaarheid nodig en ook goede onzekerheidsberekeningen, zodat ze het gereedschap kunnen leveren, dat nodig is om nieuwe optische materialen te kunnen karakteriseren.

Het EMPIR-project ATMOC draagt bij tot het aanpakken van deze belangrijke uitdaging door de ontwikkeling van geavanceerde en herleidbare optische meettechnieken, die geschikt zijn om de industrie in de hightechsector te ondersteunen. Hierbij zullen ook de gebruikte wiskundige modellen verbeterd worden. Een database met optische materiaaleigenschappen zal gecreëerd worden. Het project is gestart op 1 juli 2021 en loopt tot en met eind juni 2024. Er is vooral gewerkt aan de herleidbaarheidsvraagstukken en bijhorende karakterisering, vergezeld met de ontwikkeling van wiskundige modellen.

VSL draagt bij met de zelf ontwikkelde scatterometer, die in dit project zal worden ingezet voor het meten van samples met een gelaagde structuur. Er is onderzoek uitgevoerd naar karakteriseringsmethoden van scatterometers, rekening houdend met alle mechanische vrijheidsgraden, evenals karakterisering van het invoerveld ervan.

In 2022 is het onderzoek naar de scatterometer voortgezet door mogelijke foutbronnen te analyseren. De voorlopige onzekerheidsbegroting is opgesteld. De scatterometer is (mede in het kader van POLight en TracOptic) verbeterd door een piëzo-tafel toe te voegen bovenop de stabiele basis van de monstertafel om de punt en kanteling van het monster te regelen, evenals beweging in de Z-as voor een betere focus. De kalibratie van de piëzo-tafel in x- en y-richtingen is gestart, maar vanwege een onverwachte storing is de tafel naar de fabrikant gestuurd voor reparatie. Er is een start gemaakt met het opstellen van het onzekerheidsbudget, waarbij geometrievariaties en extra lagen met verschillende brekingsindices aan de structuurmodellen zijn toegevoegd en onderzocht.

Er is input gegeven aan projectpartner CNRS voor wat betreft het overzicht van modelleringsmethoden. Ook is er gestart met het onderzoek naar de invloed van tussenlaagruwheid door het bestuderen van een relevant wetenschappelijk artikel en het simuleren van een tweelagensysteem met een simpele vorm van tussenlaagruwheid.

Op basis van een theoretische modellering is een schatting van de invloed van oppervlakteruwheid van multilagen in diffractieroosters op de meetresultaten gemaakt. Ook is er een theoretisch foutenmodel ontwikkeld waarmee de gevoeligheden van de meetresultaten voor verschillende foutenbronnen onderzocht kan worden. Op de SMSI conference 2023 in Nürnberg is hierover een presentatie gegeven. Tevens is er een peer reviewed artikel gepubliceerd over het gebruik van virtuele instrumenten in scatterometrie.

Aanvullende metingen met de scatterometer zijn volgens plan uitgevoerd en lopen nog verder door in 2024. Ook het afronden van de database loopt door tot 2024 door enkele vertragingen bij projectpartners. Het onzekerheidsbudget voor “single-wavelength” scatterometrie in het algemeen is opgesteld en ingediend als deliverable. Het budget geeft richtlijnen voor welke componenten in een setup, welke bijdrage leveren. Daarnaast is er nog een conferentie gehouden genaamd: “MACRO meets NANO in measurement for diagnostics, optimization and control”. Hierin werden speciale sessies op het gebied van nanofabricage en onzekerheidsevaluatie gegeven voor bedrijven en universiteiten.

De link naar de projectwebsite is: <https://www.atmoc.ptb.de/home/>.

4.5 Digitalisatie

4.5.1 EMN Mathmet (Mathmet)

Dit Joint Network Project (JNP), dat liep van juni 2019 tot en met mei 2023, had als doel ondersteuning te bieden voor het European Metrology Network (EMN) Mathmet voor wiskunde en statistiek. Binnen

het project heeft VSL bijgedragen aan de strategische onderzoeksagenda (SRA), waarvan PTB de hoofdauteur is, en aan een set Mathmet Quality Assurance Tools (QAT) voor software, data en guidelines, waarvan de ontwikkeling door NPL geleid wordt.

Begin 2023 heeft EURAMET feedback gegeven op de SRA. Ondersteund door VSL en andere partners heeft PTB dit in een nieuwe draft van de SRA verwerkt, en deze is opnieuw opgestuurd naar EURAMET ter goedkeuring.

In mei 2023 is de definitieve versie van de QAT is bij EURAMET ingediend. In maart 2023 heeft VSL meegewerkt aan een webinar over de QAT waarvoor ruim 100 geïnteresseerden zich geregistreerd hadden. In mei is er een statische online versie van deze training gemaakt.

In januari 2023 is de vergadering van de Stakeholder Advisory Committee van het EMN bijgewoond, waar TNO vanuit Nederland in deelneemt. Het JNP project dat EMN Mathmet ondersteund is in mei 2023 afgelopen. VSL heeft in mei zowel aan de afsluitende online projectvergadering deelgenomen, als aan de fysieke afsluitende workshop in Turijn.

In het Mathmet project is het Europese metrologienetwerk voor wiskunde en statistiek uitgebouwd. Hiervoor heeft een stakeholderconsultatie plaatsgevonden om de behoeftes van de industrie, standaardisatiecommissies en andere belanghebbenden in kaart te brengen. Dit heeft geleid tot een strategische onderzoeksagenda met de volgende drie hoofdthema's: 'artificial intelligence and machine learning', 'computational modelling and virtual metrology' en 'data analysis and uncertainty evaluation'. VSL heeft aan alle drie de thema's bijgedragen en is penvoerder geweest bij het derde thema. In het project is ook een set 'Quality Assurance Tools' ontworpen die gebruikt kunnen worden om de kwaliteit van metrologische software, data en richtlijnen te waarborgen. VSL heeft hier input voor gegeven en de tools aan de hand van een aantal use cases geëvalueerd. Vanuit Nederland is TNO lid geworden van de 'Stakeholder Advisory Committee'. VSL heeft twee publicaties in dit project verricht, bijgedragen aan verschillende presentaties, aan een webinar en aan een e-learning course over de kwaliteitstools die binnenkort op de BIPM website gepubliceerd zal worden.

De link naar de EMN-website is: <https://www.EURAMET.org/european-metrology-networks/mathmet>.

4.5.2 Raamwerk voor data science en modelling

Dit doorlopende project biedt de recent bij VSL gecreëerde Data Science en Modelling (DSM) groep de mogelijkheid om generieke vaardigheden en kennis te ontwikkelen en verbeteren. De ontwikkelde capaciteiten kunnen in het vervolg worden ingezet ter ondersteuning van onderzoeksprojecten bij andere technologieën en bij eigen onderzoeksprojecten.

Een voorlopige lijst van de meest gebruikte eXplainable artificial intelligence (XAI) methodes is gemaakt. Verder is de convolutional neural networks (CNN) techniek (een type machine learning) toegepast om een inverse probleem van een flowcytometer op te lossen. Dat wil zeggen het bepalen van de radius en brekingsindex van een deeltje gegeven de beelden van het verstrooide licht. Ook is bij deze toegepaste methode de onzekerheid van de CNN voorspelling onderzocht. De eerste tussenresultaten zijn mondeling gepresenteerd bij MSMM 2023. De literatuurstudie naar interpreteerbare machine learning algoritmes is afgerond en een rapport is geschreven naar aanleiding hiervan.

De eerste versie van de Good Practice Guide voor data science bij VSL is afgerond en in gebruik genomen. De guide vormt de basis van het kwaliteitsraamwerk voor data science en zal naar aanleiding van ervaringen in de praktijk beoordeeld worden op mogelijke verbeteringen.

Tot slot is VSL in de zomer van 2023 aangesloten bij de EURAMET TC-IM werkgroep Metrology for digital transformation. Hiermee blijft VSL op de hoogte van ontwikkelingen op het gebied van digitalisering van metrologie.

4.5.3 Betrouwbare virtuele experimenten en digital twins (ViDiT)

Hoofddoel van het EPM project ViDiT, dat loopt van mei 2023 tot en met april 2026, is het ontwikkelen van richtlijnen voor de ontwikkeling en het gebruik van metrologisch verantwoorde Virtuele Experimenten (VE) en Digitale Twins (DT), met als concrete doelen:

1. GUM-conforme methoden ontwikkelen voor de onzekerheidsevaluatie met behulp van VE/DT.
2. Het ontwikkelen van methoden voor de validatie van VE/DT.

Hiermee kan de praktische toepasbaarheid worden aangetoond van de ontwikkelde methoden in verschillende metrologische toepassingen van virtuele experimenten en digitale tweelingen.

De officiële start van het project was op 1 mei 2023. Op 1 juni 2023 heeft de kick-off meeting plaatsgevonden in Turijn en op de voorafgaande MSMM23 workshop heeft VSL een aantal aan het project gerelateerde onderzoeksuitdagingen gepresenteerd. Er is een literatuuronderzoek verricht naar de state-of-the-art van onzekerheidsberekening bij virtuele experimenten en er hebben discussies plaatsgevonden met de projectpartners m.b.t. de compatibiliteit van deze methodes met de JCGM:GUM. Er is ook een literatuuronderzoek verricht naar beschikbare methoden voor surrogaatmodellering.

De link naar de projectwebsite is: <https://www.vidit.ptb.de/home>.

4.5.4 Fundamentele eigenschappen van sensor netwerken (FunSNM)

Hoofddoel van het EPM project FunSNM, dat loopt van september 2023 tot en met augustus 2026, is de ontwikkeling van de noodzakelijke fundamentele principes ten behoeve van een metrologisch verantwoord gebruik van sensornetwerken, met als concrete doelen:

1. Ontwikkeling van methode voor onzekerheidsrekening voor een sensornetwerk met zowel correlaties tussen de sensoren als temporele correlaties.
2. Ontwikkeling van een methode om gemiddelde waarden met een verschillende onderliggende middelingstijd op een metrologisch verantwoorde manier met elkaar te vergelijken.
3. Implementatie van de ontwikkelde algoritmes in een algemeen software framework.

Met behulp van verbeterde methodes zal de onzekerheid van sensornetwerken nauwkeuriger berekend kunnen worden. Hierdoor kan de waarde van sensornetwerken voor metrologische toepassingen beter worden ingeschat, en dit kan het gebruik van dergelijke netwerken mogelijk vergroten.

De officiële start van het project was op 1 september 2023. Op 4 oktober heeft de kick-off meeting plaatsgevonden in Helsinki. Er is een literatuurstudie uitgevoerd naar methodes die de bovenstaande wiskundige problemen kunnen oplossen. Op basis hiervan is een rapport geschreven waarin de onderzoeksproblemen wiskundig zijn geformuleerd en de methodes die deze problemen kunnen oplossen worden beschreven. Er is met de Universiteit van Helsinki contact gelegd om deze wiskundige methodes toe te passen op hun dataset van een sensornetwerk luchtkwaliteit sensoren in Helsinki. Tot slot is een literatuurstudie uitgevoerd naar indicatoren die de kwaliteit van een sensornetwerk dataset kunnen kwantificeren. Dit is tevens onderzocht door middel van een survey onder de eigenaren van de verschillende use cases in het project.

De link naar de projectwebsite is: <https://www.funsnm.eu/>.

4.6 Overige projecten

4.6.1 Verbetering van bestaande chemiefaciliteiten

Als onderdeel van het doorlopende verbeterproject voor bestaande faciliteiten bij Chemie is in de eerste helft van 2023 gewerkt aan het verbeteren van het bereiding van lage concentraties NO₂ gasmengsels in N₂. Voor de studie zijn in april/mei zes nieuwe mengsels bereid door middel van een directe verdunning in N₂ vanuit een primair VSL standaard gasmengsel (PSM) met een hogere fractie NO₂.

Tegelijkertijd zijn ook twee mengsels gemaakt met de standaardmethode (NO+O₂) ter vergelijking. De verificatie na bereiding en de 1 en 3 maanden stabiliteit metingen van de hele set is uitgevoerd. Daarnaast is de meting van salpeterzuur (een marker voor de reactie van NO₂ met vocht naar HNO₃) uitgevoerd voor de hele set. De resultaten van de nieuwe methode versus de standaardmethode lijken voorsnog in overeenstemming te zijn, maar meer stabiliteitsmetingen, gepland in 2024, zullen meer informatie leveren.

Voor het verbeteren van de analyse van lage fracties (1 µmol/mol) met behulp van een verdunningssysteem, is een test uitgevoerd met het gebruik van molblocs. Hierbij zijn drie hoge concentratie NO₂-mengsels verdund tot 1 ppm en met elkaar werden vergeleken. De resultaten laten afwijkende resultaten zien, mogelijk veroorzaakt door adsorptie van het meetsysteem. Een vergelijkbare test zal in 2024 worden herhaald, mogelijk met een andere analyzer.

Voor het maken van HCl-mengsels vanuit puur HCl (gas) is een speciale vul-unit aangeschaft bij Nippon Gas België. Deze groep heeft jarenlange ervaring op dit gebied en deze vul-unit is essentieel voor het veilig werken met HCl en om corrosie van de opstelling te minimaliseren. Het systeem is in oktober geïnstalleerd, waarna zijn druk en lektesten uitgevoerd. Het systeem is klaar om de eerste gasmengsels te maken in 2024.

4.6.2 Ontwikkeling kalibratiemethode voor viscosimeters

Dit project, dat loopt van 2021 tot en met 2023, had als doel om een proof-of-concept uit te werken en om dit vervolgens om te zetten in een nieuwe kalibratiedienst voor viscositeitsmeters.

Nadat de proof-of-concept meetopstelling in 2021 is voltooid zijn er begin januari 2022 metingen uitgevoerd en is het werkingsprincipe geëvalueerd. Hieruit kon worden geconcludeerd dat viscosimeters herleidbaar kunnen worden gekalibreerd onder enkele opgestelde voorwaarden. Echter, hierbij is helaas gebleken dat de stabiliteit en herhaalbaarheid van de viscosimeter een dusdanig hoge bijdrage geeft aan de onzekerheid dat er twijfel is ontstaan of het ontwikkelen van deze service toegevoegde waarde heeft voor de beoogde gebruikers, omdat onze kalibraties normaal gesproken lagere onzekerheden bevatten. Contact met de leveranciers heeft hier uiteindelijk niet geleid tot andere inzichten en conclusies, waarna is besloten niet verder te gaan met deze ontwikkeling.

Het resterende budget is deels herbestemd voor een andere kwaliteitsuitdaging binnen dezelfde technologie: het kalibreren van viskeuze vloeistoffen via hydrostatisch wegen. In november 2023 is gestart met de volume bepaling van een massastuk via aerostatisch wegen om vervolgens dit massastuk te kunnen gebruiken in een nieuwe hydrostatische weegopstelling. Het concept van aerostatisch wegen is eerder gedaan bij VSL met als toepassing het volume te bepalen van massastukken voor het gebruik in het massalab. Eind 2023 is de vroegere methode van aerostatisch wegen opnieuw in gebruik genomen en uitgevoerd. Daarmee is het volume van een eerste prototype zinker bepaald, waarbij de zinker het massastuk is dat bij de hydrostatische dichtheidsbepaling gebruikt wordt. Ook zijn de voorbereidingen getroffen aan de hydrostatische weegopstelling en is deze gereed voor gebruik. De hydrostatische wegingen kunnen in 2024 worden uitgevoerd waarna het onzekerheidsbudget hiervan kan worden opgesteld om te bepalen of deze methode het beoogde resultaat biedt.

4.6.3 Verbetering bestaande faciliteiten DC/LF

Als onderdeel van het doorlopende verbeterproject voor bestaande DC/LF-faciliteiten bij Elektriciteit is in 2022 een nieuwe weerstandsbrug geselecteerd en besteld. De levering hiervan was vertraagd naar begin 2023. Deze nieuwe brug is gekalibreerd bij METAS als onderdeel van de acceptatieprocedure, maar de afwijking viel op een aantal punten buiten de specificatie. Nadat de leverancier dit heeft hersteld door een geheel nieuwe brug te leveren, is bij de verzending schade opgetreden. Na acceptatietesten bij VSL is er weer geconstateerd dat de brug niet voldoet aan de specificatie. De fabrikant gaat dit in Q1 2024 herstellen.

Er werd een gedetailleerde studie uitgevoerd naar de "Haalbaarheid van regelbare burdens" en er is een werkdocument opgesteld waarin de burdens zijn ingedeeld op basis van verschillende criteria:

flexibiliteit, frequentiebereik, belastingsbereik, stroom/spanningsbereik en selectie van leveranciers voor de nieuwe burdens. De nieuwe burdens zijn besteld en worden begin 2024 geleverd.

Er is onderzoek gedaan naar de stabiliteit en nauwkeurigheid van de meetalgoritmes in de sampling LCR software. Naar aanleiding hiervan zijn een aantal verbeteringen doorgevoerd. Daarnaast is de software uitgebreid met ondersteuning voor fractionele frequenties. In 2024 zullen de laatste verificatiestappen worden gedaan.

4.6.4 Verbetering bestaande faciliteiten HF

Als onderdeel van het verbeterproject voor bestaande HF-faciliteiten bij Elektriciteit is een referentiewafer voor on-wafer kalibraties tot 330 GHz ontworpen. De referentiewafer beschikt over kalibratiestandaarden geschikt voor Short-Open-Load-Reciprocal (SOLR) en Through-Reflect Line (TRL) kalibraties. Daarnaast is er een divers aantal validatiestandaarden ontworpen, als voorbeeld verzwakkers tot 60 dB voor lineariteitsvalidatie. Er zijn ook standaarden ontworpen voor RF-probe-isolatiemetingen.

4.6.5 Pulse-driven Josephson

In dit project, dat liep van 2019 tot en met 2023, werd gewerkt aan het upgraden van de pulse-driven Josephson spanningsstandaard, om de metingen betrouwbaarder te maken en het spanningsbereik te vergroten.

Eind 2020 is het huidige Josephson array defect geraakt. Het array is naar NIST in de VS gestuurd voor onderzoek. De conclusie was dat het niet meer te repareren viel. Wel heeft NIST VSL voorzien van een minder goed, gebruikt array om te kijken of VSL daarmee verder kon. Helaas blijkt dit exemplaar niet goed te matchen met de VSL-opstelling. Daarom is besloten om een nieuw array aan te schaffen. Begin 2022 is een nieuw pulse-driven Josephsonarray bij NIST besteld en medio 2022 geleverd. Na testen in het najaar 2022, is het array nu operationeel.

De uitdaging blijft om de losse segmenten in serie te schakelen met behoud van de quantumnauwkeurigheid. Om het gebied te vergroten waarin het array kan functioneren zijn line equalisation filters getest. Deze hebben helaas niet het verwachte effect opgeleverd. Als alternatief wordt gekeken of er een optische isolator kan worden aangeschaft. Deze optische isolator wordt bij NIST al gebruikt om het probleem van het in serie schakelen op te lossen. De isolator zorgt ervoor dat er geen aardlussen ontstaan door de aangesloten compensatie signalen.

Eind 2022 hebben we met de pulse-driven opstelling succesvol één van de transferstandaarden van AC/DC gekalibreerd tot 160 mV. Bij het in serie schakelen moet dit een 1 V worden. Bij 1 V is het ook makkelijker vast te stellen of het array ook daadwerkelijk is gekwantificeerd. Voor het optimaliseren van de pulsen die naar het array gaan, wordt eraan gedacht om een regelbare stub in het HF pad te integreren. In 2023 is het helaas niet gelukt om een optische isolator aan te schaffen. De fabrikant heeft moeite met leveren. Hierdoor zijn de andere doelen binnen dit project ook niet gehaald. Er wordt gezocht naar een alternatieve oplossing binnen een ontwikkelproject in het werkplan van 2024.

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

Het project is op 1 juni 2023 gestart en loopt tot en met mei 2026. Het true8digit project heeft als doel om ideeën te verzamelen voor het bouwen van een digitizer die voor metrologische doeleinden gebruikt kan worden. De verzamelde ideeën zullen in een mogelijk vervolg project in samenwerking met een fabrikant worden gebouwd.

Het doel van VSL binnen dit project is het uitzoeken van een nieuwe digitizer. In een aantal meetopstellingen binnen VSL wordt nu gebruik gemaakt van een digitizer die mogelijk in de toekomst niet meer gemaakt wordt.

In 2023 is er gekeken naar het ontwerpen van een lage-ruisvoeding voor de digitizer en mogelijke input stages. Dit werk wordt in 2024 voortgezet.

De link naar de projectwebsite is: <https://true8digit.eu/>.

4.6.7 Verbetering bestaande faciliteiten TF

Als onderdeel van het verbeterproject voor Tijd en Frequentie werd in 2022 en 2023 gewerkt aan het Two-Way-System for Time and Frequency Transfer (TWSTFT). In juli 2023 is een nieuwe schotelantenne voor het TWSTFT-systeem geïnstalleerd en meteen in gebruik genomen. De wijzigingen in de signaalvertragingen in de nieuwe antenne en bekabeling zijn bepaald en verwerkt in de kalibratiewaarden van het systeem. Een rapportage hiervan is opgestuurd naar het BIPM.

In de tweede helft van 2023 is gestart met de bestelling van componenten voor de nieuwe TF back-up faciliteit. Daarnaast zijn opties onderzocht voor fiber-verbinding tussen VSL en de toekomstige TF back-up faciliteit. Een definitieve beslissing over de locatie moet nog worden genomen. Voor de verhuizing kan de back-up faciliteit al operationeel zijn in Delft.

4.6.8 Verplaatsbare optische klokken (TOCK)

Dit project richt zich op de ontwikkeling van transportable optische klokken die ingezet kunnen worden voor key comparisons. Het project loopt van mei 2023 t/m april 2026. VSL heeft niet de intentie om zelf optische klokken te bouwen, maar draagt via dit project bij aan de activiteiten van de Universiteit van Amsterdam (UvA) om een optische klok te ontwikkelen en te karakteriseren. VSL zal hiervoor een herleidbaar frequentiesignaal beschikbaar maken aan de UvA en zal kennis opdoen over het vergelijken van een optisch frequentiesignaal ten opzichte van een microgolf frequentiesignaal.

Daarnaast heeft VSL een voortrekkersrol in het genereren van impact uit het project. In juni 2023 is een stakeholder workshop georganiseerd in combinatie met de kick-off meeting. Met UvA is overlegd over de realisatie van een verbinding van VSL naar UvA om een de frequentie van UTC(VSL) beschikbaar te maken in het lab van de UvA. Hierin krijgen we ondersteuning van SURF.

De link naar de projectwebsite is: <https://www.ptb.de/epm2022/tock/home>.

4.6.9 Verbetering bestaande faciliteiten Lengte

In 2023 is gewerkt aan specifieke verbeteringen voor de picodriftopstelling, de flowcycometer en aan scatterometrie en ptychografie. Dit laatste in samenwerking met TUD en TUE op het gebied van modellering.

Bij de picodriftopstelling is de opstelling verder verbeterd, met name de optische uitlijning. Door verbetering van de optische uitlijning is er meer optisch laservermogen in de interferometer cavity zodat er een verbeterde signaal-ruisverhouding kan worden gerealiseerd. Metingen hebben aangetoond dat de gevoeligheid voor kortdurende (korter dan een minuut) signalen vergelijkbaar is met behaalde resultaten in het verleden en goed genoeg is voor de kalibratie van de virtuele standaarden. De laserfrequentiestabilisatie is verbeterd door een extra loop te realiseren in de software die de laserfrequentie van de diode laser telkens bijstuurt als die uit de regeling dreigt te raken. Metingen hebben aangetoond dat door deze verbetering de opstelling tientallen uren stabiel kan draaien. In de eerste helft van 2024 zullen er verdere verbeteringen en metingen worden uitgevoerd in een stageopdracht met een student van de TU/e

Met de brekingsindexopstelling is de dispersie relatie bepaald van water, Dulbecco's Phosphate Buffered Saline (DPBS), zoutoplossing, verdunningen van bloedplasma, verdunningen van het bloedplasma test sample uit METVES II, bovine serum albumin in DPBS, trehalose in DPBS, trehalose en bovine serum albumin in DPBS, de schiedevloeistof van Becton Dickinson, isopropanol, toluen en mengsels van isopropanol en toluen. Verder zijn voorbereidingen getroffen voor nieuwe experimenten met het brekingsindex matchen van silica nanodeeltjes en is de flowcytometer uitgebreid met faseplaat en donut laserbundel. Door de brekingsindex van silica nanodeeltjes te bepalen is er een referentie deeltje om de grootte en brekingsindex van flowcytometer data te verifiëren. Mogelijke vervolgstappen zijn verbetering van het neurale netwerk voor bepaling van de grootte en brekingsindex, en

vermindering van achtergrondsignaal van het vloeistofkanaal middels annealing om de vereiste hoeveelheid achtergrondsignaal voor het neurale netwerk te verkrijgen.

Scatterometrie en ptychografie komen aan bod in de projecten LINX en Synoptics. VSL heeft in 2023 deelgenomen aan de LINX-eindgebruikersbijeenkomsten, waarbij de publicaties van de TU Delft, de TU Eindhoven en de Universiteit Utrecht zijn gereviewed. Tevens is de bijdrage besproken voor het uitvoeren van herleidbare AFM-metingen. In 2023 zijn, als onderdeel van de samenwerking tussen de TU Delft en VSL in het Synoptics-project scatterometrie- en ptychografiemetingen op 1D-grating samples uitgevoerd met behulp van VSL-faciliteiten. VSL nam tevens deel aan eindgebruikersbijeenkomsten en heeft promovendi ondersteund bij het uitvoeren van metingen.

4.6.10 Verbetering bestaande faciliteiten Optica

Een haalbaarheidsstudie naar de mogelijkheden om de absolute cryogene radiometer (ACR) te vervangen, begon in 2022 en werd in mei 2023 afgerond. De studie omvat de kosten-batenanalyses die horen bij drie opties: het upgraden van het bestaande systeem; het volledig vervangen van de ACR; of het uitbesteden van de SI-traceerbaarheid. De geschatte tijdlijnen voor investeringen die in het onderzoek zijn ontwikkeld, variëren van 2 jaar tot 6 jaar.

Bij het verzamelen van informatie voor het onderzoek zijn in 2022 en begin 2023 interviews gehouden met 2 fabrikanten van apparatuur, 7 NMI's en 8 commerciële organisaties. In februari 2023 heeft bij VSL een bijeenkomst plaatsgevonden met 2 leden van de Raad van Deskundigen om de in het onderzoek uitgewerkte casussen te presenteren. Na bestudering van hun bevindingen werd het onderzoek begin mei 2023 afgerond. Verdere stappen zijn in afwachting van het Strategisch Advies over de rol van een primaire standaard voor radiometrie.

4.6.11 Nieuwe kalibratiestandaarden en -methoden voor radiometrie en fotometrie na uitfasering van gloeilampen (NEWSTAND)

Dit EPM-project is per 1 juni 2023 van start gegaan en loopt tot en met mei 2026. Het doel van VSL is het toepassen en werken met nieuwe methodes en procedures voor detector-gebaseerde-herleidbaarheid van spectrale metingen met array spectroradiometers. VSL zal binnen de samenwerking bijdragen aan de open access guidelines voor eindgebruikers.

Daarnaast zal er een breedbandige en spectraalverstelbare standaardbron voor spectrale irradiantie kalibraties in het UV-VIS-NIR gebied worden ontwikkeld. Deze bron wordt ontwikkeld om in combinatie met de bestaande opstelling te functioneren.

In 2023 zijn de eerste plannen opgesteld en is er een marktonderzoek uitgevoerd om te kijken naar de commercieel beschikbare smal- en breedbandige bronnen. Er is contact gezocht met Nederlandse stakeholders voor een samenwerking in karakterisatie en kalibraties voor array-spectroradiometers als referentiestandaard voor spectrale irradiantie. In 2024 zal VSL verder werken aan de ontwikkeling van een kalibratieservice voor deze meters.

De link naar de projectwebsite is: <https://www.ptb.de/epm2022/newstand/home>.

4.6.12 LED-gebaseerde schaalrealisatie voor illuminantie, lichtstroom en luminantie

Het doel van het project, dat loopt van 2023 tot en met 2025, is de schaalrealisatie van fotometrische grootheden met behulp van een LED-gebaseerde lampstandaard in combinatie met een op silicium gebaseerde fotodiode trap detector, en implementatie van bijbehorende herleidbaarheidsroutes. De herleidbaarheidsroutes worden ingekort voor illuminantiemeters; LED-bronnen worden gebruikt voor een primaire schaalrealisatie voor lichtstroom. Correctie op de illuminantie schaalrealisaties met behulp van de LED-bron moet worden gemaakt door de relatieve spectrale power distributie van het CIE-referentiespectrum L41 in het golflengtebereik van 360 nm tot 830 nm en golflengtetoeename van 1 nm.

Eind 2023 zijn er schaalrealisatiemetingen voor de primaire illuminatiemeter uitgevoerd. Er is begonnen met de analyse van de resultaten en een beoordeling van de kwaliteit. Deze analyse loopt verder door in 2024 met zowel een onzekerheidsanalyse en kwaliteitsdocumentatie die zullen worden opgesteld.

4.6.13 Verbetering bestaande faciliteiten Volumetrie

Dit project heeft tot doel om een aantal in het standaardenbeheer ontdekte verbeterpunten aan te pakken. Deze verbeteringen van faciliteiten richten zich op het in stand houden of verbeteren van bestaande CMC's en het terugbrengen van uitval.

In 2023 is de eerste helft van het vervangen van de sensoren van de LFI (Low Flow Installatie) gebeurd. Het investeringsvoorstel om de LFI aan te vullen met referentiemeter(s) om het kalibreren van laagfrequente meters of volumegebaseerde flowmeters te verbeteren is uitgesteld naar 2024. Ook het verbeteren van de betrouwbaarheid van de GOPP (Gas Oil Piston Prover) is uitgesteld naar 2024.

5 Lijst met afkortingen

1PPS	1 Pulse Per Second
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
BHV	Bedrijfs hulpverlening
BIO	Baseline Informatiebeveiliging Overheid
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures
BTEX	Benzeen, toluen, ethylbenzeen en xyleen
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
GENELEC	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
CMM	Coördinaten Meetmachine
COPA	Composite OPERational Amplifier
CRM	Certified Reference Material
CT	1. Continuïteitstoelag; 2. Current Transformer
DC	Direct Current
DCPQ	DC Power Quality
D-MT	Digital Metrology Twin
DOK	Directe Orderkosten
DPT	Digitale Piezo Translator
DSM	Data Science en Modeling
DT	Digital Twin
ECFM	European Center for Flow Measurement
EEA	European Environment Agency
EFTF	European Frequency and Time Forum
EIS	Electrical Impedance Spectroscopy
EMN	European Metrology Network
EMPIR	European Metrology Programme for Innovation and Research
EMRP	European Metrology Research Programme
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
EZK	Ministerie van Economische Zaken en Klimaat
FAIR	Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable
FENELAB	Federatie Nederlandse Laboratoria
FLASH-RT	FLASH-radiotherapie
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
GI	Grote Installatie
GNSS	Global Navigation Satellite System
GOPP	Gas Oil Piston Prover
GPIB	General Purpose Interface Bus
GPS	Global Positioning System
GSG	Ground Signal Ground
GSS	Grote Stralings Standaard
GUM	Guide to the expression of Uncertainty in Measurement
H2-ICE	Hydrogen Internal Combustion Engine vehicles.
HD HRS	Heavy Duty Hydrogen Refilling Stations
HDR	High Dose Rate
HENG	Hydrogen Enriched Natural Gas
HF	Hoogfrequent
HPC	High Performance Computing
HT-SPRT	High-Temperature Standard Platinum Resistance Thermometer
HVCDB	High Voltage Capacity Bridge
HyQS	Hydrogen Quality Standard
IAEA	International Atomic Energy Agency
IC	Integrated Circuit
IEC	International Electrotechnical Commission
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
JCGM	Joint Committee for Guides in Metrology
KCDB	Key Comparison Database
KDT JU	Key Digital Technologies Joint Undertaking
KET	Key Enabling Technology
LBG	Liquefied Biogas
LDR	Low Dose Rate
LF	Laagfrequent
LFI	Low Flow Installatie
LNG	Liquefied Natural Gas
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
MSB	Magnetic Suspension Balance
MVS	Machine Vision Systems
NA	Numerieke Apertuur
NEN	Nederlands Normalisatie Instituut
NMI	Nationaal Metrologie Instituut
NTP	Network Time Protocol
NUC	Netherlands URSI Committee
OIML	International Organization for Legal Metrology
OPO-CRDS	Cavity Ringdown Spectroscopy with Optical Parametric Oscillator
P&ID	Piping & Instrumentation Design
PD	Partial Discharge
PEM	Polymer Electrolyte Membrane
PKL	Platform Kwaliteit Lucht
PMJTC	Primaire Planar Multi-Junction Thermal Converter
PPV	Practical Peak Value
PQ	Power Quality
PRM	Primary Reference Material
PSM	Primair Standaard Mengsel
PstLM	Short term Perceptability for Light Modulation
PT	Proficiency Testing
PTP	Precision Time Protocol
QHR	Quantum Hall Resistance
RAKR	Reference Air Kerma Rate
RF	Radio Frequency

RMC	Robot Mass Comparator
RNT	Radio Nuclide Therapie
RvA	Raad voor Accreditatie
RvD	Raad van Deskundigen
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
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
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
TDLAS	Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy
TIC	Time Interval counter
TLM	Temporal Light Modulation
TraSys	Traceability System
TSB	Time Service Bulletin
TWSTFT	Tweeweg Satelliet Tijd- en Frequentietransfer
URSI	Union Radio-Scientifique Internationale
UTC	Universal Time Coordinated
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