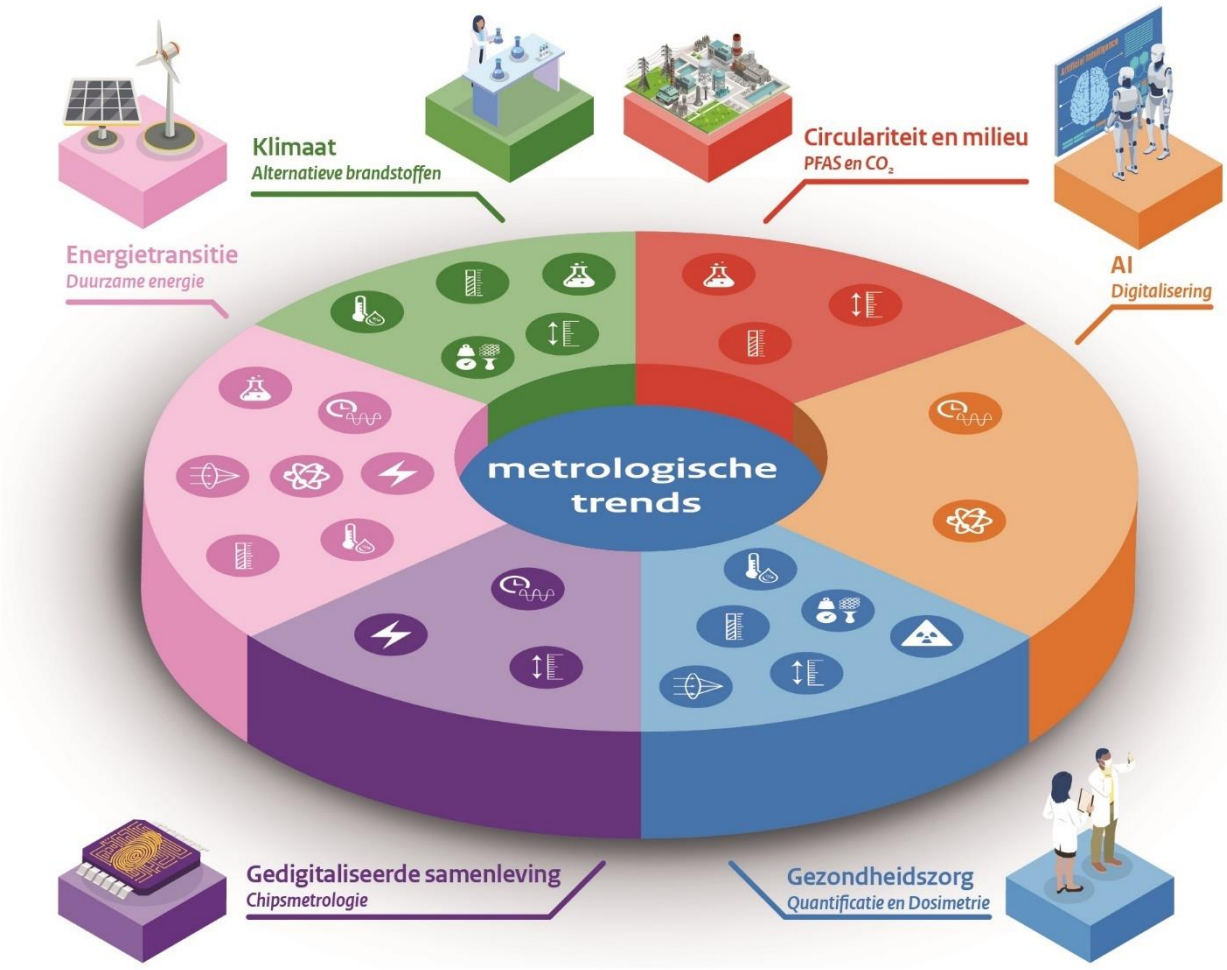
Raad van deskundigen voor de nationale meetstandaarden

INGESTELD BIJ DE METROLOGIEWET, ARTIKEL 4 (STB. 2 FEB. 2006)

"Maatgevend Vooruit: Strategische Visie op de Rol van Metrologie de Komende Vijf Jaar"

Strategisch Advies 2024-2028



COLOFON

Dit advies is opgesteld door de Raad van Deskundigen voor de Nationale Meetstandaarden, bestaande uit:

ing. A.H. Boer (André)	Voorzitter / Krohne
dr. J.B. van de Kamer (Jeroen)	NKI
prof. dr. H. Haitjema (Han)	KU Leuven / Mitutoyo
prof.dr.ir. J.C. Lötters (Joost)	UT / IST-AG
prof. dr. C.A. Ramírez (Andréa)	TU Delft
prof.dr.ir. J.F.G. Cobben (Sjef)	TU/e
dr. O. El Gawhary (Omar)	TU Delft / ASML
prof.dr.ir. F.B.J. Leferink (Frank)	UT / Thales
dr.ir. M.C.A.M. Peters (René)	TNO

Het secretariaat van de Raad is gevestigd bij:
Rijksdienst voor Ondernemend Nederland
t.a.v. Dr. Marieke Bruinsma
Ministerie van Economische Zaken
Prinses Beatrixlaan 2 | 2595 AL | Den Haag
Postbus 93144 | 2509 AC | Den Haag

Inhoudsopgave

Infographic 5
Deel A: Management overzicht en adviezen op hoofdlijnen 6
A1. Historisch gezien weerspiegelt de samenstelling van de Raad de metrologische vakgebieden .. 6
A.2 Beschrijving van de interactie tussen maatschappelijke trends en de metrologie 6
A.3 De rol van Nederland in Europees/Internationaal metrologieverband 7
A.4 Human Capital 8
A.5 Klant- en marktgerichtheid binnen Nederland 8
A.6 Adviezen op hoofdlijnen 8
Deel B: Inhoudelijke beschouwing en adviezen per (metrologisch) werkgebied 10
B.1 Chemie 10
B.1.1 Achtergrond 10
B.1.2 Overzicht 11
B.1.3 Aanbevelingen 11
B.2 Elektriciteit 14
B.2.1 Achtergrond Laagfrequent Elektriciteit 14
B.2.2 Overzicht Laagfrequent Elektriciteit 15
B.2.3 Aanbevelingen Laagfrequent Elektriciteit 16
B.2.4 Achtergrond Hoogfrequent Elektriciteit 16
B.2.5 Overzicht Hoogfrequent Elektriciteit 17
B.2.6 Aanbevelingen Hoogfrequent Elektriciteit 17
B.3 Tijd en frequentie 18
B.3.1 Achtergrond Tijd en Frequentie 18
B.3.2 Overzicht Tijd en Frequentie 18
B.3.3 Aanbevelingen Tijd en Frequentie 19
B.4 Ioniserende straling 20
B.4.1 Achtergrond Ioniserende straling 20
B.4.2 Overzicht Ioniserende straling 20
B.4.3 Aanbevelingen Ioniserende straling 21
B.5 Massa en gerelateerde grootheden 24
B.5.1 Achtergrond Massa 24
B.5.2 Overzicht Massa 24
B.5.3 Aanbevelingen Massa 24
B.5.4 Achtergrond Dichtheid 24
B.5.5 Overzicht Dichtheid 25

B.5.6 Aanbevelingen Dichtheid 25
B.5.7 Achtergrond Druk 25
B.5.8 Overzicht Druk 25
B.5.9 Aanbevelingen Druk 25
B.5.10 Achtergrond Viscositeit 26
B.5.11 Overzicht Viscositeit 26
B.5.12 Aanbevelingen Viscositeit 26
B.6 Lengte 27
B.6.1 Achtergrond Lengte 27
B.6.2 Overzicht Lengte 28
B.6.3 Aanbevelingen Lengte 29
B.7 Temperatuur en Luchtvochtigheid 31
B.7.1 Achtergrond Temperatuur en Luchtvochtigheid 31
B.7.2 Overzicht Temperatuur en Luchtvochtigheid 32
B.7.3 Aanbevelingen Temperatuur en Luchtvochtigheid 32
B.8 Optica 33
B.8.1 Achtergrond Optica 33
B.8.2 Overzicht Optica 33
B.8.3 Aanbevelingen Optica 33
B9. Volumetrie 35
B.9.1 Achtergrond Volumetrie 35
B.9.2 Overzicht Volumetrie 36
B.9.3 Aanbevelingen Volumetrie 37
B.10 Data Science & Modelling (DSM) 38
B.10.1 Achtergrond DSM 38
B.10.2 Overzicht DSM 38
B.10.3 Aanbevelingen DSM 38
Lijst met afkortingen 40

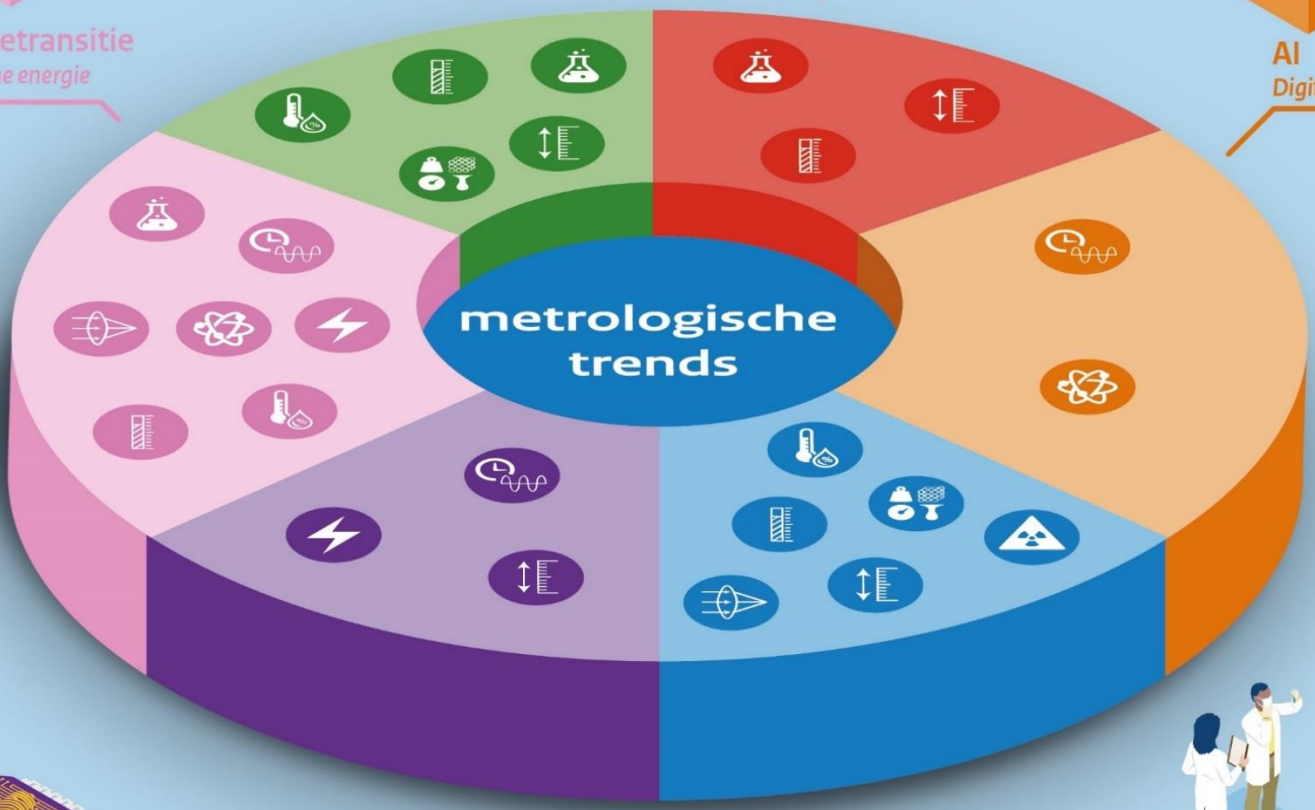
Raad van deskundigen voor de nationale meetstandaarden

Het ministerie van Economische Zaken heeft de Raad van Deskundigen voor de Nationale Meetstandaarden gevraagd om haar inzicht te geven in de ontwikkeling van de behoefte aan meetstandaarden voor de komende 5 tot 10 jaar. In dit Strategisch advies 2024-2028 geeft de Raad, rekening houdend met de globale ontwikkelingen op het gebied van energietransitie, circulariteit, klimaat, gezondheidszorg, digitalisering en AI, haar advies omtrent de noodzaak van het voortzetten van meetstandaarden, de noodzakelijke nieuwe ontwikkelingen en de kansen voor Nederland om haar rol op specifieke metrologische gebieden te versterken en of te ontwikkelen.

Klimaat
Alternatieve brandstoffen

Circulariteit en milieu
PFAS en CO_2

Energietransitie
Duurzame energie



AI
Digitalisering

Gedigitaliseerde samenleving
Chipsmetrologie

Gezondheidszorg
Quantificatie en Dosimetrie

metrologische werkgebieden

Deel A: Management overzicht en adviezen op hoofdlijnen

Het ministerie van Economische Zaken heeft de Raad van Deskundigen voor de Nationale Meetstandaarden gevraagd om haar inzicht te geven in de ontwikkeling van de behoefte aan meetstandaarden voor de komende 5 tot 10 jaar. In dit Strategisch advies 2024-2028 geeft de Raad, rekening houdend met de globale ontwikkelingen op het gebied van energietransitie, circulariteit, klimaat, gezondheidszorg en digitalisering, haar advies omtrent de noodzaak van het voortzetten van meetstandaarden, de noodzakelijke nieuwe ontwikkelingen en de kansen voor Nederland om haar rol op specifieke metrologische gebieden te versterken en of te ontwikkelen.
Het Strategisch Advies van de Raad kan tevens als leidraad gebruikt worden voor het Strategisch Plan van VSL.

A1. Historisch gezien weerspiegelt de samenstelling van de Raad de metrologische vakgebieden

Dit zijn **Chemie** (B1), **Elektriciteit en Magnetisme** (B2), **Tijd en Frequentie** (B3), **Ioniserende straling** (B4), **Massa** (B5), **Druk en Viscositeit** (MDV) (B6), **Lengte** (B7), **Temperatuur en Luchtvochtigheid** (B8)**, Optica (**B8**) en Volumetrie** (B9). In lijn met die indeling is dit Strategisch Advies in dienovereenkomstige hoofdstukken opgesteld. Per hoofdstuk zal worden ingegaan op de achtergrond, het huidige meetarsenaal en worden aanbevelingen gedaan voor wat betreft de toekomstige ontwikkelingen.

Metrologie speelt ook een rol bij de groeiende stroom aan data. Het is van belang om, voorafgaand aan de verwerking ervan, data te kunnen evalueren. Daarnaast worden steeds vaker rekenmodellen, aan de hand van ***A**rtificial **I**ntelligence* (AI), gebruikt waarvan het in metrologisch opzicht belangrijk is de werking te evalueren. Dit heeft ertoe geleid om het vakgebied ***Data Science & Modeling*** (DSM) (B10) toe te voegen.

A.2 Beschrijving van de interactie tussen maatschappelijke trends en de metrologie

In de afgelopen 4 jaar na het verschijnen van het laatste Strategisch Advies zijn de uitdagingen op het gebied van nauwkeurige, van maatschappelijk belang zijnde, metingen alleen maar toegenomen. Op het gebied van circulariteit en milieu zijn metingen en herleidbaarheid naar standaarden van bijvoorbeeld stikstofverbindingen, Per- en polyfluoralkylstoffen (PFAS) en koolstofdioxide cruciaal voor de economische ontwikkeling in Nederland. Hetzelfde geldt voor de uitdagingen op het thema klimaat en energie transitie. De afbouw van fossiele brandstoffen in de mobiliteit, gebouwde omgeving en industrie zal leiden tot nieuwe energiedragers die naar verwachting op grotere schaal hun intrede zullen gaan doen en elk hun eigen metrologische uitdaging met zich mee zullen brengen. Zo zullen nieuwe energiedragers zoals waterstof, ammoniak, methanol en synthetische brandstoffen (*e-fuels*) het komende decennium hun intrede maken en tot nieuwe metrologische vragen leiden op het gebied van volumetrie en chemie. Met name waterstof zal veel toepassingsgebieden krijgen waar grote uitdagingen zijn wat betreft zuiverheid (kritisch voor brandstofcellen) maar ook emissies (waterstof is een indirect broeikasgas).

Door elektrificatie van vervoer, verwarming en industriële processen wordt een stabiel en robuust elektriciteitsnetwerk steeds belangrijker. Van centrale opwek in grote centrales met aansluitingen op hoogspanningsnetten verschuift het systeem steeds meer naar decentrale opwek op laag en middenspanningsnetten. De gebouwde omgeving en bedrijventerreinen worden meer producent en gebruiker van duurzame energie tegelijk, en digitale systemen worden meer toegepast om tot *smart energy systems* en *hubs* te komen. Hier liggen nieuwe metrologische uitdagingen zowel

op laagfrequent als hoogfrequente elektronica. Ook metingen aan het, door congestie geplaagde, elektriciteitsnet spelen nu en in de toekomst een steeds belangrijker rol. Hierbij speelt ook tijd (tijdstempels) een belangrijke rol bij het zoeken van correlaties tussen diverse grootheden.
De transitie naar een energie-efficiënte en gedigitaliseerde samenleving gaat noodzakelijkerwijs via de productie van nieuwe generaties elektronicachips, waarvan de relevantie is bewezen door het tekort dat ze de afgelopen twee jaar hebben ondervonden. Metrologie voor de halfgeleidersector blijft een belangrijk ingrediënt om een dergelijke transitie te faciliteren.

Daarnaast leiden nieuwe ontwikkelingen in de gezondheidszorg, zoals nuclidentherapie voor bijvoorbeeld prostaatkanker, tot nieuwe metrologische uitdagingen.

A.3 De rol van Nederland in Europees/Internationaal metrologieverband

Nederland neemt haar rol in metrologisch verband op belangrijke vakgebieden goed waar. Zo neemt VSL deel in de Europese samenwerkingsverbanden (EURAMET en *European Metrology Networks* (EMN)) en levert de voorzitter voor *Energy Gases* en was voorzitter van *Smart Electricity Grids*. Vakgebieden die een grote rol spelen in de energietransitie. Door het voorzitterschap van deze EMN's kan VSL mede de Europese agenda bepalen op het gebied van metrologie op deze gebieden en als metrologie instituut een leidende rol spelen. Dit versterkt de positie die Nederland wil spelen op de introductie van duurzame (energie) gassen en slimme elektriciteitsnetten.

Daarnaast levert VSL de voorzitter van de Technische Commissie flow van EURAMET, hetgeen de kennis en ervaring van VSL weerspiegelt. VSL heeft verder een lid in het Internationaal Comité voor Maten en Gewichten (CIPM), die tevens voorzitter is van de adviescommissie voor elektriciteit en magnetisme (CCEM), en levert zo een sterke bijdrage aan de groeiende profilering van de Elektriciteitsgroep van VSL.

Als VSL binnen Europa koploper wordt voor tijddisseminatie, kan VSL vervolgens een voortrekker zijn voor een Europese, betrouwbare disseminatie van tijd.

Het VSL is erg goed gepositioneerd wat betreft de dosimetrie voor radiotherapie en moet die positie behouden. Echter, de EPM (European Partnership on Metrology)-financiering voor nieuwe activiteiten op dit onderwerp lijkt de laatste tijd minder vanzelfsprekend. Het verdient daarom aanbeveling om naar andere financieringsbronnen te zoeken voor dergelijk, klinisch zeer relevant onderzoek. Dit sluit goed aan bij lopende initiatieven van VSL om bekend te staan als kennisinstituut wat verkrijging van gelden uit onderzoeksfondsen kan vergemakkelijken.

Tevens is een betere aansluiting met de halfgeleiderwereld wenselijk, aangezien Nederland het meest relevante bedrijf in Europa in de sector huisvest. Hier kan een verbinding met dimensionale metrologie van logic nanochips, geheugens, enz. de weg openen naar nieuwe mogelijkheden.

AI valt niet meer weg te denken. Het is ook aan te bevelen voor één of meerdere AI-modellen grondig uit te zoeken hoe onzekerheden doorwerken en daar mogelijk handvatten voor de industrie en ontwikkelaars uit te destilleren. Verder is onderzoek nodig naar het optreden van hallucinaties, dat wil zeggen het genereren van foutieve antwoorden die niet gebaseerd zijn op de onderliggende data. Zo kan *data science* gebruikt worden om diagnosemodellen voor meetapparatuur in de industrie te ontwikkelen of toegepast worden in *predictive maintenance*. Wellicht kan VSL dan op termijn de onzekerheidsanalyse helpen auditeren en het risico op hallucinatie inschatten, zodat bedrijven zich kunnen laten accrediteren voor hun modellen. VSL wordt aangemoedigd hier het voortouw in te nemen zodat hun expertise op dit gebied herkend wordt. Daarnaast zal met deze grotere bekendheid mogelijk marktvraag gegenereerd worden en zal DSM bekend worden bij EURAMET zodat er een goede startpositie wordt verworven als EURAMET meer projecten op DSM gaat opzetten.

A.4 Human Capital

Naast de inhoudelijke technologische ontwikkelingen vormt *human capital* een uitdaging. De basis van een goed functionerende organisatie wordt gevormd door goed geschoolde, gemotiveerde en professionele medewerkers. Activiteiten om het personeelsbestand op niveau te houden en, daar waar nodig, uit te breiden zijn van cruciaal belang. Daarom adviseert de raad om de verbanden met de Technische Universiteiten en Hogescholen goed te onderhouden. Dit niet alleen door ruimte te geven aan stagiaires en afstudeerders, maar ook door gastcolleges te geven en te werken met deeltijd docentschappen. Kennis disseminatie leidt tot verbreding van het netwerk en vergroot daarmee de potentiële instroom van nieuwe medewerkers. Het geven van cursussen eventueel in samenwerking met werkgeversorganisaties (zoals bijvoorbeeld FHI, FME, VNO-NCW, ONL) en het presenteren van metrologische ontwikkelingen op seminars zijn daar goede middelen voor. Binnen de organisatie zelf is het belangrijk dat medewerkers multi-inzetbaar zijn om zo back-up en continuïteit in de dienstverlening en technologische ontwikkeling te behouden.

A.5 Klant- en marktgerichtheid binnen Nederland

Het VSL heeft in Nederland een goede marktpositie in het leveren van kalibraties met de hoogste nauwkeurigheid. In de metrologische infrastructuur, waarbij Raad voor Accreditatie (RvA)-erkende laboratoria de verdere disseminatie verzorgen, heeft het VSL een cruciale en erkende rol. Toch kan de zichtbaarheid van het VSL binnen de industrie en het onderwijs worden vergroot en verbeterd. Dit kan via het geven van colleges en workshops binnen onderwijsinstellingen en bedrijven, het aanbieden van cursussen dat al op redelijke schaal gebeurt, en het deelnemen in nationale gremia betreffende vaktechnische aspecten van metingen en kalibraties; men denke aan Nederlands Normalisatie Instituut (NEN)-commissies of technische verbanden van erkende laboratoria. Ook het deelnemen als vakdeskundige bij laboratoriumevaluaties verbetert het contact met de markt en de zichtbaarheid.

VSL heeft de afgelopen jaren meer ingezet op samenwerking in nationale innovatie programma's, zoals het Groeifonds (GroenvermogenNL), Topsector voor Kennis in Innovatie (TKI) en Missie georiënteerde innovatie (MOOI), waarin met bedrijven, kennisinstituten en universiteiten wordt samengewerkt in onderzoek en innovatie. Hiermee wordt de zichtbaarheid van VSL vergroot qua naam en inhoudelijke kennis. Bovendien worden er extra innovatie middelen vrijgemaakt naast de Europese middelen die via *European Metrology Programme for Innovation and Research* (EMPIR) en het *Europese Partnerschap voor Metrologie* (EPM) beschikbaar zijn voor onderzoek in de metrologie. VSL zal moeten blijven streven erkend te worden als kennisinstituut bij NWO.

De prijsstelling en klantgerichtheid van het VSL verdient voortdurende aandacht. De Raad constateert daarmee het belang van klantgerichtheid, zichtbaarheid en prijsstelling van VSL.

A.6 Adviezen op hoofdlijnen

- Speel in op de vraag die voortkomt uit de klimaatdoelstellingen. Dit wat betreft meting van *fugitive emissions* (stikstofoxiden, koolstofdioxide) maar ook PFAS.
- Ontwikkel metrologie die goed aansluit bij de nieuwe ontwikkelingen in de nucleaire geneeskunde en radiotherapie.
- Maak verbinding met de belangrijke halfgeleidersector in Nederland en probeer waarde op te bouwen op de lange termijn, om een strategische partner te worden om zo de Nederlandse halfgeleider sector op het gebied van chipsmetrologie te ondersteunen en versterken.

- Tijd en andere metrologische grootheden zijn een onderdeel van de kritische infrastructuur (onafhankelijke plaatsbepaling, data integriteit, authenticatie en veiligheid). Het is van belang dat de rol die VSL hier in kan nemen ondersteund wordt.

- Zet in op een bredere aanpak voor het financieren van onderzoek. Streef ernaar als kennisinstituut erkend te worden bij NWO en houd ruimte in het budget voor het doen van nieuwe, mogelijk risicovolle projecten om nieuwe markten aan te boren;
- Zet in op het deelnemen of opzetten van nationale publiek private samenwerkingen op het gebied van onderzoek en innovatie zoals Groeifonds (GroenvermogenNL, NextGenHightech), Topsectoren (TKI Energie, Chemie of HighTech) of MOOI programma's op onderwerpen als di-waterstof, ammoniak, koolstofdioxide, elektriciteit, emissies, offshore energy, etc.
- Betrek meer ministeries bij de maatschappelijke rol van VSL, zoals RIVM/VWS waar het gaat om gezondheid en milieu of landbouw waar het gaat om (NOx-)emissies.

- Werk pro-actief aan *Human Capital*, niet alleen voor de instroom, maar ook voor de kennis en flexibiliteit van de aanwezige medewerkers. Werk aan kennisdisseminatie door middel van cursussen voor derden. Gebruik hiervoor de contacten en inzet van netwerkorganisaties.

- Gebruik ervaring, kennis en bestaande middelen om de rollen te pakken die belangrijk zijn voor de NL energie transitie economie en sluit aan op leidende thema's waar Nederland een strategisch belang heeft of wil opbouwen, eventueel in afstemming met collega instituten. Denk aan waterstof (met Physikalisch- Technische Bundesanstalt Deutschland), *high-tech*, duurzame chemie etc. Hiermee kan de standaard gezet worden voor de rest van Europa en het *'thought leadership'* van VSL worden versterkt.
- Blijf strategisch inzetten op deelname in European Metrology Networks in volgende of trekkende rol;

- Data Science & Modelling krijgt momentum. De metrologische aspecten hiervan moeten in kaart gebracht worden en er moeten richtlijnen voor opgesteld worden. Belangrijk is om hier expertise op te bouwen omdat dit een vakgebied gaat worden dat alle andere zal doorkruisen.

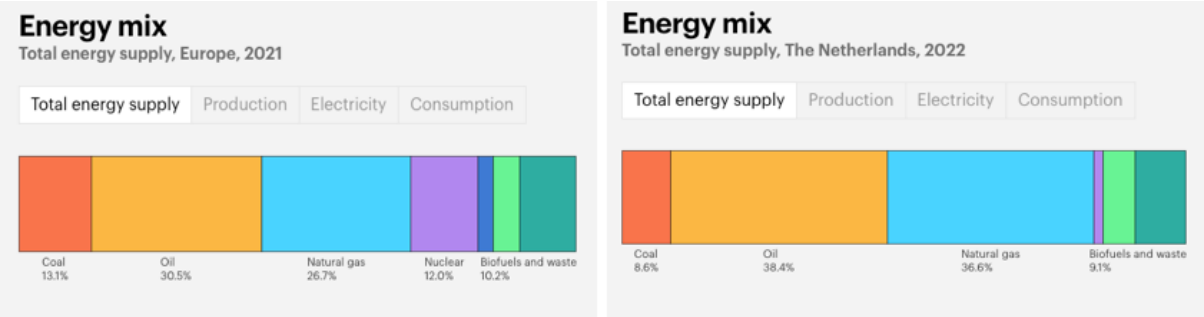
- Ga kritisch om met de bestaande activiteiten. Als er weinig tot geen marktvraag voor een herleidbare meting bestaat, als het verder geen belangrijk onderdeel uitmaakt van een andere interne meetketen of als er een goed alternatief is, discontinueer deze meting dan. De RvD adviseert VSL om, voor die activiteiten waarvoor VSL geen taak meer voor zich ziet weggelegd, te onderzoeken bij welke bedrijven / RvA-erkende laboratoria in Nederland deze activiteit eventueel nog voortgezet zou kunnen worden. Dit om te voorkomen dat mogelijk relevante metrologische activiteiten uit Nederland verdwijnen.

Deel B: Inhoudelijke beschouwing en adviezen per (metrologisch) werkgebied

B.1 Chemie

B.1.1 Achtergrond

We bevinden ons midden in een grote transformatie van het Europese energiesysteem op weg naar een netto-nul economie. Momenteel zijn fossiele brandstoffen goed voor ongeveer 70% van de energiemix in Europa en voor 84% in Nederland (zie figuur 1.1). Het defossiliseren van het energiesysteem zal daarom een radicale verandering vereisen in de manier waarop we energie produceren en consumeren, waarbij we in alle sectoren van de economie overstappen van fossiele brandstoffen naar koolstofarme en hernieuwbare energiebronnen.



Figuur 1.1. Aandeel fossiele brandstoffen in de energiemix (bron: International Energy Agency)

Op Europees niveau zijn verschillende beleidsmaatregelen ontwikkeld om deze uitdaging te ondersteunen, waaronder de Europese Green Deal (2019), de Europese Klimaatwet (2021), het '*Fit for 55'*-pakket (2021), het *RePowerEu*-plan (2022), en het Industrieplan *Green Deal* (2023). In Nederland streven het Nationale Klimaatakkoord (2019) en de Nederlandse Klimaatwet naar een aanzienlijke toename van hernieuwbare elektriciteit (70% groene stroom in 2030), verandering in de mobiliteitssector (bijvoorbeeld gebruik van elektrische voertuigen en/of koolstofarme waterstof), verdere uitrol van alternatieve energiebronnen zoals waterstof en biomethaan, en grootschalige productie en gebruik van koolstofarme gassen voor de industriële sector. In deze context zijn de Nederlandse waterstofstrategie en de routekaart voor groen gas ontwikkeld om de grootschalige productie en het gebruik van koolstofarme waterstof en een verscheidenheid aan op bio-energie gebaseerde gassen, waaronder biomethaan, te versnellen. De introductie van *REDIII Europese directive* dwingt bedrijven naar groene alternatieven voor energiedragers te gaan (*Renewable fuels of non-biological origin* - zoals waterstof, groen gas en synthetische brandstoffen), terwijl het *Emission Trade System*-1 en 2 de ruimte voor koolstofdioxide uitstoot richting 2040 afbouwt en de prijs voor koolstofdioxide uitstoot zal opdrijven.

De energietransitie vereist een goed gedefinieerde metrologie (primaire standaarden, referentiemethoden, instrumenten en best beschikbare praktijken) ter ondersteuning en verwezenlijking van de beleidsdoelstellingen. Toepassingen omvatten onder meer emissiebenchmarking, naleving van regelgeving, toegang tot financiering, inkoopbeleid, voortgangsregistratie en toegang tot de koolstofdioxidemarkt.

B.1.2 Overzicht

VSL heeft een leidende positie in de wereld op het gebied van gasanalyses; de chemische normen voor gasanalyses hebben een belangrijke rol voor de BV Nederland en zullen die rol blijven spelen. VSL beheert gasvormige referentiematerialen in de vorm van PRM's (*Primary Reference Materials*), CRM's (*Certified Reference Materials*) en CGM's (*Calibrated Gas Mixtures*). Deze laatste worden veelal door derden gemaakt en door VSL ingemeten.

Tabel 2.1 toont de beheerde referentiematerialen zoals beschreven in K999 (Health and Safety Code (HSC) code CH 01, CH02 en RM 20). Het basisbeheer van de meetopstellingen dient om de inzetbaarheid te garanderen van de meetopstellingen voor het verrichten van verificatiemetingen aan nieuwe sets standaarden en primaire referentiematerialen en voor het uitvoeren van certificering van mengsels van derden (K999 scope). Het omvat het beheer van de analyseapparatuur, de bereidingsfaciliteiten, de verdunningssystemen en de cilinders. Voorts worden ter ondersteuning van de standaardenbeheer ook door VSL periodiek automatiseringswerkzaamheden uitgevoerd. Ten slotte speelt VSL een belangrijke rol in verschillende metrologie- en standaardisatiebijeenkomsten en -commissies op internationaal niveau.

Mengsels	**Molecuul**
Binaire	Ethanol (in lucht en stikstof); zuurstof (in stikstof); koolstofmonoxide (in lucht en stikstof); koolstofdioxide (in lucht en stikstof); stikstofoxiden (NO, NO_2 en HNO_3); zwaveldioxide; methaan; propaan (in lucht en stikstof); lachgas (in lucht en stikstof); water (in lucht en stikstof); waterstofchloride (in stikstof); zwavelwaterstof (in lucht); kwik; ammoniak (in stikstof)
Multicomponent	*Energy gases* (aardgas, *refinery gas*, biogas, *coke-oven gas*); *automotive gas; stack gas*; vluchtige organische componenten (VOC, BTEX, sVOC, oxy-VOC); siloxanen, zwavelcomponenten

Tabel 2.1 Beheerde referentiematerialen

B.1.3 Aanbevelingen

Zoals hierboven aangegeven vergt de transitie naar een duurzaam energiesysteem een verandering van de productie en het gebruik van energiedragers. De energietransitie is gebaseerd op het gebruik van alternatieve energiebronnen zoals syngas, biogas, biomethaan, ammoniak en waterstof. Omdat bovendien de meeste chemische producten koolstof in het molecuul nodig hebben, worden er nieuwe technologieën ontwikkeld die gebruik maken van alternatieve koolstofbronnen (koolstofdioxide, biomassa en afval) in wat wordt aangeduid als koolstofdioxide-gebruik, bio-energie/raffinaderijen en routes van afval naar chemicaliën. Daarom wordt overgegaan van een handvol goed gekarakteriseerde energiedragers naar een groot aantal (energie)grondstoffen die heterogener zijn wat betreft chemische samenstelling en gedrag en die beter moeten worden begrepen om veilige en efficiënte verwerking, transport en distributie te garanderen.

De door de energietransitie veroorzaakte veranderingen zullen het nodig maken om de huidige werkzaamheden uit te breiden en nieuwe uitdagingen aan te gaan in gebieden met momenteel beperkte metrologische activiteiten. Dit zal uitdagingen met zich meebrengen op het gebied van personele en financiële middelen. Het verdient aanbeveling om de coördinatie op Europees niveau te behouden, ongeacht het financieringsprogramma. Gegeven de grote eisen waar VSL en andere metrologie-instituten de komende jaren mee te maken zullen krijgen, zal internationale coördinatie en

samenwerking van cruciaal belang blijven om de kritische massa te bereiken die nodig is om het fundamentele onderzoek, de ontwikkeling en de implementatie uit te voeren.
Hieronder staan specifieke aanbevelingen vermeld.

- Bij de alternatieve energiedragers ligt de nadruk op de dragers die de komende jaren waarschijnlijk een sleutelrol zullen spelen (biogas, biomethaan en waterstof). In het kader van EMPIR heeft VSL gewerkt aan de ontwikkeling van (nieuwe) meetinfrastructuur voor deze gassen om hun fysieke parameters en gedrag te kunnen meten onder omstandigheden die typerend zijn voor hun productie- en distributieprocessen. Deze inspanningen moeten worden voortgezet om de industriële ontplooiing in Nederland te kunnen ondersteunen. Het is echter van belang om naast waterstof ook te gaan nadenken over syngas en waterstofdragers zoals ammoniak, methanol en LOHC (*liquid organic hydrogen carriers*), omdat deze op de middellange termijn een rol kunnen spelen, vooral in de (maritieme) transport en chemische sector. Metingen van samenstelling, energie-inhoud en stroming, evenals het begrijpen van het gedrag onder variërende omstandigheden (druk, temperatuur), rechtvaardigen verder onderzoek.
- Een belangrijke factor voor de energietransitie is de ontwikkeling van infrastructuur (bijvoorbeeld pijpleidingen). Of het nu gaat om koolstofdioxide, waterstof of waterstofdragers zoals ammoniak, verdere ontwikkeling en validatie van technieken voor lekdetectie van pijpleidingen is nodig om lekken in pijpleidingen efficiënt te kunnen monitoren en lokaliseren. Het is belangrijk om netwerklekmodellen en hun nauwkeurigheid te valideren. Ook bij energieopslag is lekkage een belangrijk aspect. Op het gebied van veiligheid is verder begrip en validatie van verspreidingsmodellen, inclusief pluimmigratie, nodig ter ondersteuning van veiligheidsbeoordelingen.
- Het meten van onzuiverheden blijft een belangrijke uitdaging voor de metrologie. Deze uitdaging is al aanwezig met de huidige brandstofmix (bijvoorbeeld koolstofdioxide in aardgas) en zal aan belang toenemen naarmate we overstappen op andere energiedragers. Onzuiverheden kunnen giftig zijn, apparatuur en infrastructuur beschadigen of tot operationele inefficiënties leiden. Zowel het gebruik van waterstof in brandstofcellen als het gebruik van koolstofdioxide in directe elektrokatalyse zullen bijvoorbeeld nauwkeurige analyses vereisen om ervoor te zorgen dat er geen onzuiverheden zijn (zoals waterstofsulfiden of zware metalen) die de membranen zouden kunnen beschadigen. Verdere ontwikkeling van real-time, in-situ monitoring is daarom van cruciaal belang om ervoor te zorgen dat er op tijd corrigerende maatregelen kunnen worden genomen.
- Nauwkeurige metingen van luchtverontreinigende stoffen zoals koolstofmonoxide, stikstofoxiden, zwaveldioxide en benzeen zijn vereist om te voldoen aan de Europese richtlijnen over de luchtkwaliteit en schone lucht. De komende jaren zullen nog meer onzuiverheden moeten worden gekarakteriseerd en gemonitord. Een voorbeeld hiervan is de uitstoot van nieuwe stoffen als gevolg van de afvang van koolstofdioxide, zoals aminen en nitrosaminen. Deze nieuwe onzuiverheden vereisen ook een beter inzicht in hun potentiële impact op de omgevingslucht, bijvoorbeeld op de atmosferische chemie en het bepalen van achtergrondniveaus. Het is belangrijk op te merken dat er momenteel verschillende nieuwe technologieën in ontwikkeling zijn, met name voor directe koolstofdioxide-afvang, waarvoor de uitstoot van onzuiverheden nog onbekend is en follow-up vereist.
- Om naleving van het klimaatmitigatiebeleid te garanderen vormt meting en monitoring van koolstofdioxide voor overheden en belanghebbenden de hoeksteen. Dit wordt verder versterkt door de opkomst van vrijwillige koolstofmarkten en de toenemende behoefte aan negatieve emissies die niet alleen traceerbaarheid van koolstofdioxide in termen van de

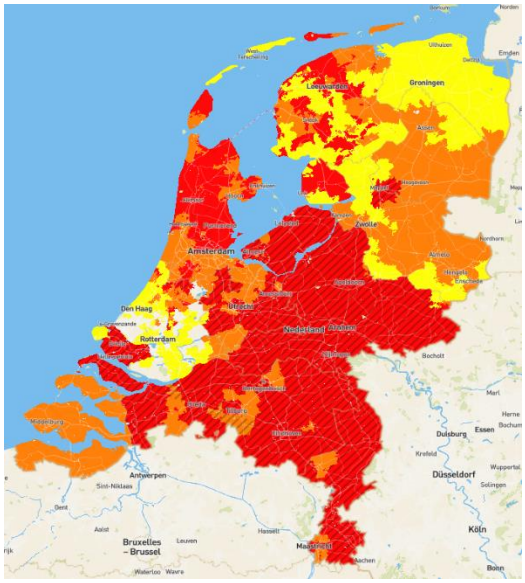
stroom en samenstelling vereisen, maar ook van hun fossiele/biologische/atmosferische oorsprong, bijvoorbeeld door het meten van isotopenverhoudingen. Dit vereist verdere ontwikkeling van gasreferentiematerialen voor de isotopenverhouding.

- Naast koolstofdioxide zijn methaan en lachgas (N_2O) belangrijke broeikasgassen. Het terugdringen van deze emissies is een van de meest effectieve manieren om de opwarming van de aarde te beperken. Historisch gezien kennen de (indirecte) methoden, die tegenwoordig worden gebruikt om de uitstoot te kwantificeren, vaak grote onzekerheden op regionale, subregionale of faciliteitsniveaus. Daarmee blijft nauwkeurige meting van methaan en lachgas emissie een prioriteit binnen het klimaatbeleid.

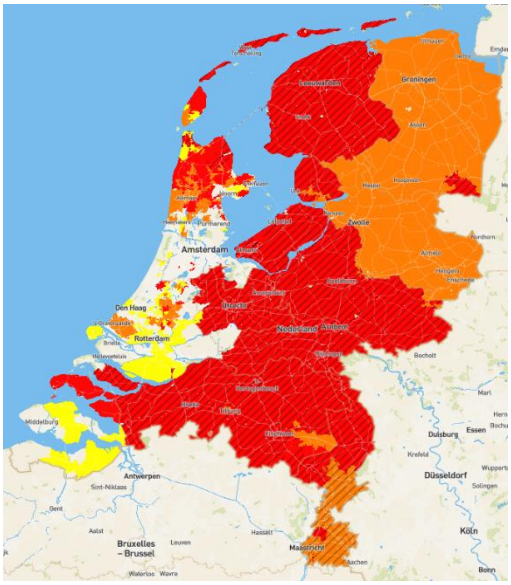
B.2 Elektriciteit

B.2.1 Achtergrond Laagfrequent Elektriciteit

De infrastructuur voor de energietransitie staat onder grote druk. De congestie in de elektriciteitsnetten is groot. In onderstaande figuren is de congestie zichtbaar voor zowel congestie bij belasting (links) als congestie bij opwek (rechts). In de oranje en rode gebieden in Nederland zijn er ernstige problemen met de capaciteit van het net.



*Figuur 2.1a: Congestie belasting**



*Figuur 2.1b: Congestie opwek**

*Rood: capaciteit niet beschikbaar; oranje: capaciteit voorlopig niet beschikbaar; geel capaciteit beperkt beschikbaar; blank: capaciteit beschikbaar. * Data netbeheer Nederland d.d.: 01-12-2023*

Netuitbreidingen en optimaal netbeheer zijn noodzakelijk om op korte en langere termijn de netproblemen op te lossen. Om de belastbaarheid van de infrastructuur beter te bemeten worden vele sensoren in het net geplaatst, die afhankelijk van de toepassing, een bepaalde nauwkeurigheid en herleidbaarheid moeten hebben.

De stabiliteit van het net zal door de afname van conventionele centrales en toename van met vermogenselektronica aan het net gekoppelde duurzame bronnen (zon en wind) geregeld en bewaakt moeten worden door opwekkers en belastingen die variëren met frequentie en spanning. Ook hiervoor zullen betrouwbare sensoren en regelingen aanwezig moeten zijn.

Bij beide onderwerpen zal ook de toepassing en gebruik van grootschalige hoeveelheid data (van o.a. slimme meters) een rol spelen bij een efficiënt beheer en gebruik van het elektriciteitsnet. Ook het gebruik van data voor de snelle analyse van verstoringen in het elektriciteitsnet zal impact hebben op de digitalisering, data-analyse en metrologie rondom elektriciteitsnetten en *vice versa*. Ook nauwkeurige tijdstempels van signalen zal belangrijk zijn om propagatie van signalen te kunnen analyseren.

De gemelde problemen met netcongestie leiden ook tot grote uitdagingen in de industrie. Verandering van processen (van gas naar elektriciteit) zijn geen vanzelfsprekendheid. De industrie zal ook de energie efficiënter moeten gaan gebruiken. Dit levert veel vragen op over verliesmetingen, bepalen van rendement van toestellen, systemen en processen.

De duurzame energiebronnen en de toename in gelijkspanningsapplicaties (DC) leiden ook tot een (tot nu toe) geringe groei in gelijkspanningsnetten. Voor de verdere ontwikkeling van deze DC-

netten en installaties is metrologie een noodzaak om te komen tot herleidbare *Power Quality* aspecten bij gelijkspanning en het vastleggen van *Power Quality*-kenmerken en acceptabele toleranties in normen.

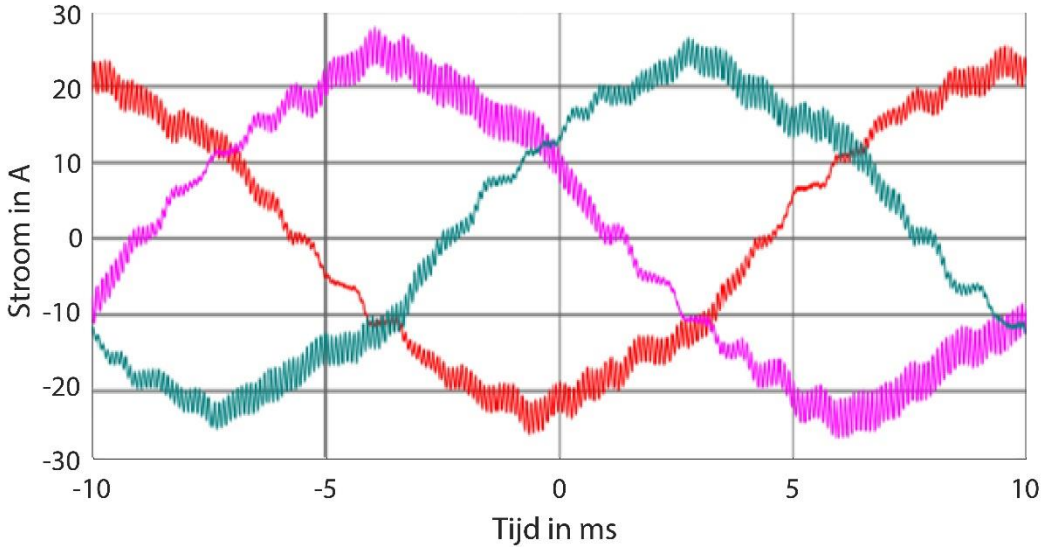
Zowel binnen netten als installaties is er een motivatie om te komen tot meer efficiënte netten of installaties. Bij installaties wordt dit ondersteund door de NEN 1010 (deel 8- Energie efficiëntie en slimme installaties). In deze norm worden veel aspecten van efficiëntie opgesomd en kan een installatie worden gecertificeerd op basis van verkregen efficiency.

De consument (van energie) zal meer producent van energie worden: een *prosumer*. Daardoor is er een toenemende behoefte aan nauwkeurige(r) energie metingen.

Transport zal meer gebruik maken van elektriciteit, en de gebruikers van elektrische voertuigen willen een betrouwbare meting van de energie die afgenomen wordt bij elektrische laadpunten. Daarnaast wordt de noodzaak van een accurate voorspelling van de overgebleven actieradius op basis van de batterij steeds belangrijker. Mogelijk dat in samenwerking met DSM en de industrie hiervoor modellen kunnen worden ontwikkeld.

Tevens zien we meer niet-lineaire apparatuur in de vorm van elektronische apparatuur die het net vervuilen, maar ook kunnen filteren.

Bepalen van de efficiency en de verliezen in componenten (vermogenselektronica, laders, converters voor zonnepanelen, etc.) en systemen, gerelateerd ook aan verstoringen (zie figuur 2.2), zal nieuwe metrologische uitdagingen geven.



Figuur 2.2: Verstoring in een 50 Hz-3-fase wissel stroom. De kleuren geven de drie fases weer

B.2.2 Overzicht Laagfrequent Elektriciteit

Voor laagfrequent elektriciteit moeten de nodige investeringen worden gedaan voor het goed kunnen onderhouden van de meetstandaarden en om tegemoet te kunnen komen aan de wensen van de markt. Zo moet de Josephson-opstelling op korte termijn worden vervangen, maar moeten ook nieuwe investeringen worden gedaan voor nieuwe behoeften. Hierbij kan bijvoorbeeld worden gedacht aan frequentiemetingen tot een frequentie van 150 kHz waar in het *Power Quality*-domein eerder tot 2.5 kHz werd gemeten. Dit is ook in lijn met de aanpassingen in de IEC 61000-4-30.

Daarnaast moet kritisch gekeken worden naar alle opstellingen in dit domein. Regelmatig zijn er defecte componenten en een meerjarenplan voor noodzakelijke investeringen kan hier inzicht in geven.

Naast een investeringsplan is het noodzakelijk een visie te ontwikkelen over de benodigde opstellingen in de komende 10 jaar en hoe realisatie van dit plan kan plaatsvinden.

B.2.3 Aanbevelingen Laagfrequent Elektriciteit

Gezien de geschetste achtergrond kunnen op het gebied van laagfrequent elektriciteit de volgende speerpunten worden onderschreven en onderwerpen die hierbij van belang zijn en impact hebben op de benodigde inspanningen van VSL:

- Het vergroten en beter uitnutten van de capaciteit van de elektriciteitsnetten door meer data-analyse die verwacht overschot en tekort meer in balans brengt, waardoor sneller en effectiever overschot en vraag afgestemd kan worden.
- Toepassen van nieuwe sensortechnologie en analysetools om stabiliteit en betrouwbaarheid van het net te verbeteren.
- Nieuwe standaarden om de verdere ontwikkeling van slimme netten en slimme installaties te ondersteunen.
    - Het maken van meetstandaarden en procedures voor het meten van eigenschappen en efficiëntie van energiesystemen (o.a. windturbines, windparken, zonneparken).
    - Karakterisering van en onderzoek naar innovatieve stroom en spanningssensoren voor *“smart grids”,* die voor een groot deel afhankelijk zullen zijn van gegenereerde meetdata en de analyse ervan.
    - *Power Quality* in energiesystemen voor frequenties hoger dan 2,5 kHz, *DC-Power Quality* en bijbehorende meetstandaarden.
    - Deelname aan standaardontwikkeling op het gebied van batterij levensduur en efficiëntie.
    - De ontwikkeling van nieuwe laadsystemen, in samenhang met de toename op het gebied van elektrisch transport.
    - Ondersteunen van de mogelijkheden van V2G (*Vehicle to Grid*), waarbij de consument lokaal een producent is, of bijdraagt aan lokale optimalisatie (balans overschot-vraag).
- Standaardenontwikkeling voor toetsing van aangeslotenen op compliance en eisen vanuit de netcode, b.v. *Rate of Change of Frequency* / *fault ride through* (RoCoF/FRT) voor netstabiliteit.

De visie op de benodigde (toekomstige) opstellingen kan worden ontwikkeld, rekening houdend met deze aanbevelingen.

B.2.4 Achtergrond Hoogfrequent Elektriciteit

Naast de grote maatschappelijke trends energie en mobiliteit zijn er diverse technologische trends gaande. Een ervan zijn de ontwikkelingen rondom 5G en 6G en *(Industrial) Internet of Things*. De wens leeft om naar hogere frequenties met complexe elektromagnetische velden, zowel ruimtelijk als modulatie en codering, te gaan. Vaak wordt vermeld dat Nederland een handelsland is, maar Nederland is ook een *high-tech* land; *Bluetooth* is uitgevonden door Jaap Haartsen, en ook Wifi/WLAN is een Nederlandse uitvinding[1]. Ook op 6G wil Nederland een rol van betekenis spelen, wat zichtbaar is door de Groeifonds projecten die recent van start zijn gegaan. De trend om steeds hogere

[1] https://dewerelddraaitdoor.bnnvara.nl/nieuws/wereldberoemde-nederlandse-uitvindingen

frequenties in halfgeleidersystemen, en voor moderne communicatietechnieken, te gebruiken vergt extra inspanningen voor VSL.

Op dit moment worden de meeste metingen uitgevoerd met stabiele, tijds-invariante, systemen. Maar complexe elektromagnetische signalen voor de volgende generatie communicatie- en radarsystemen zijn een grote uitdaging voor de metrologie, aangezien deze signalen niet meer stabiel (in tijd, frequentie, codering en/of plaats) zijn. Snelle transiënte effecten moeten goed en herleidbaar bemeten kunnen worden, ten behoeve van prestatie maar ook blootstelling van mens en dier aan elektromagnetische velden. Het vakgebied EM velden is weliswaar enkele jaren geleden gestopt, maar door de huidige economische en maatschappelijke ontwikkelingen, vooral rondom gepulste EM velden, wordt aanbevolen dit besluit te heroverwegen. Dat vergt nieuwe inzichten en kennis, nieuwe apparatuur en uitvoering in samenwerking met de Tijd en Frequentie groep. VSL heeft inmiddels een goede reputatie op het gebied van *on-wafer* metingen opgebouwd. Tevens worden de eerste stappen gezet richting quantum: qubits en andere quantumsensoren worden met HF technieken uitgelezen.

B.2.5 Overzicht Hoogfrequent Elektriciteit

Voor hoogfrequent elektriciteit worden momenteel de juiste standaarden beheerd.

B.2.6 Aanbevelingen Hoogfrequent Elektriciteit

Gezien de geschetste achtergrond kunnen op het gebied van hoogfrequent elektriciteit de volgende speerpunten worden onderschreven en onderwerpen die hierbij van belang zijn en impact hebben op de benodigde inspanningen van VSL:

- Kennisopbouw, samen met andere nationale metrologie instituten op het gebied van gepulste hoogfrequente signalen.
- Hogere frequenties in halfgeleiders en communicatiesystemen vragen om een verdere uitbreiding van de mogelijkheden van VSL; Investeren in kennis, en zo mogelijk ook in apparatuur, is wordt aanbevolen.
- De HF kennis en ervaring, met onder andere *on-wafer* metingen en de nieuwe ontwikkelingen rondom quantum, zou geïntensiveerd kunnen worden voor verdere industriële exploitatie.
- Investeren in meten van tijdvariërende signalen, met bestaande apparatuur.
- Onderzoek naar de juiste technieken om gepulste elektromagnetische signalen te meten.

B.3 Tijd en frequentie

B.3.1 Achtergrond Tijd en Frequentie

De tijd is een parameter die bij veel activiteiten en processen een uitermate belangrijke rol speelt. Zeker bij de uitwisseling van grote hoeveelheden data is tijd en een nauwkeurige tijdstempel een vereiste. Tijd en Frequentie zou alleen al daarom moeten worden gekenmerkt als onderdeel van de kritische infrastructuur.

De afdeling tijd is al ver gevorderd met het concept 'metrologie bij de klant'. Niet alleen wordt de tijd binnen een door de klant gewenste nauwkeurigheid afgeleverd, ook kan bij de klant de lokale tijdnauwkeurigheid worden bepaald voor bijvoorbeeld computersystemen die tijd-kritisch zijn.
Typische branches die een nauwkeurige tijdregistratie nodig hebben zijn de financiële & telecom sector (time-stamps, authenticatie, beurstransacties/flitshandel, synchronisatie, 5G), Netbeheerders (*smart grids;* synchronisatie elektrische energie op het elektriciteitsnet en in tussenstations, opsporen van verstorende bronnen), defensie, verkeer & waterstaat. Met name voor de laatste twee is een zeer nauwkeurige, onafhankelijke en betrouwbare positionering noodzakelijk. In de huidige onrustige tijden, waarbij satellieten en externe tijdsignalen verstoord kunnen worden, is een onafhankelijke, lokale beschikbaarheid van accurate tijdsignalen met een hoge precisie van cruciaal belang. Deze signalen zullen continu beschikbaar moeten zijn, hetgeen preventief onderhoud vergt en bereikbaarheid van geschoold personeel, dat bij calamiteiten snel kan reageren.

Daarnaast is bij de verdergaande digitalisering accurate tijdmeting nodig voor tijdstempels, authenticatie en identificatie van data en betrouwbare borging van data integriteit. Verder zijn voor wetenschappelijke instituten als bijvoorbeeld ESTEC en ASTRON betrouwbare tijdmetingen noodzakelijk. De samenwerking met diverse (wetenschappelijke) instituten kan een bijdrage leveren aan een heel ensemble van nauwkeurige klokken, vergelijkbaar met het internet, waardoor een hoge beschikbaarheid en nauwkeurigheid stabiel geborgd kan worden. De redundantie zit dan onder andere in het gehele netwerk waarin de klok van VSL te allen tijde leidend is. Redundantie is voor deze parameter van groot belang. Binnen VSL is en zal verder gewerkt moeten worden aan redundantie en 24/7-beschikbaarheid. Samenwerking met andere partners kan de redundantie en betrouwbaarheid verder vergroten, wellicht zonder veel extra kosten voor VSL zelf. Als VSL binnen Europa koploper wordt voor tijddisseminatie, kan VSL vervolgens een voortrekker zijn voor een Europese, betrouwbare disseminatie van tijd.

De Raad beschouwt de realisatie van tijd zoals vormgegeven door het VSL een onderdeel van de kritische infrastructuur van Nederland. VSL kan deze service verlenen aan bedrijven die een hoge nauwkeurigheid en betrouwbaarheid vereisen tegen een tarief dat dit weerspiegelt. Bedrijven die lagere eisen stellen zouden tegen een lager tarief van deze service gebruik kunnen maken.
Een belangrijke uitdaging is de klanten voldoende te doen beseffen dat een dergelijke dienst voor hen noodzakelijk is of kan zijn. De 'gratis' GPS-tijd kan kwetsbaar zijn in onrustige tijden en is minder nauwkeurig dan de Europese pendant Galileo. Het verdient aanbeveling VSL de koploper te laten worden op dit vlak. Het VSL heeft zich al bewezen met onder andere het SuperGPS-project. De tijddisseminatie vanuit het VSL, een *UTC*(VSL), zou initieel Nederlands kunnen en vervolgens een basis vormen voor een Europees tijdnetwerk.

B.3.2 Overzicht Tijd en Frequentie

Kijkend naar de opstellingen nodig voor het beheer van de standaarden is het *up-to-date* houden van de klokken met de nodige redundantie in klokken alswel in het systeem om de nauwkeurige tijd bij de klanten te krijgen een vereiste. Op korte termijn moet daarom een nieuwe Cs-

klok worden aangeschaft. Ook moet er een vervolgstap worden gemaakt in het redundant maken van het systeem om de tijd bij de klanten te krijgen. Hiervoor zijn nu ideeën ontwikkeld, maar tot implementatie is het nog niet gekomen.

B.3.3 Aanbevelingen Tijd en Frequentie

Gezien de geschetste achtergrond kunnen op het gebied van tijd en frequentie de volgende speerpunten en onderwerpen worden onderschreven die hierbij van belang zijn en impact hebben op de benodigde inspanningen van VSL:

- Richt de organisatie dusdanig in dat tijd, als vitaal onderdeel van de kritische infrastructuur, betrouwbaar kan fungeren voor defensie, de financiële markt en andere hoogwaardige industrie ten behoeve van plaatsbepaling, authenticatie, data integriteit en dergelijk;
- Werken aan interne en externe redundantie van het systeem om tijd en frequentie onderdeel te kunnen laten zijn van kritische infrastructuur. Als VSL een sterke positie heeft qua tijddisseminatie, deze inzetten voor samenwerking op het gebied van tijd binnen de Europese unie.
- Gebruik van de waterstof-MASER uitbreiden, onderzoeken of een systeem met twee waterstof-MASERs en twee Cs-klokken haalbaar en wenselijk is.
- In samenwerking met partners komen tot betrouwbare applicaties en services voor leveren van betrouwbare tijd en tijdstempels (bijvoorbeeld het werken aan en verbeteren van de tweeweg satelliet tijdverschil metingen).
- Kennis verwerven met betrekking tot optische klokken en voorbereiden op een grotere rol die deze zouden kunnen krijgen in de definitie van de seconde. Mogelijk kan dit een onderdeel worden van het klokkenensemble dat redundantie moet garanderen.
- Voorbereiden van en input leveren aan een mogelijke herdefinitie van de seconde die rond 2030 wordt verwacht.

B.4 Ioniserende straling

B.4.1 Achtergrond Ioniserende straling

In de radiotherapie wordt, in het meer welvarende deel van de wereld, steeds vaker gebruik gemaakt van kleine en smalle velden vanuit verschillende hoeken waaruit het totale bestralingsveld wordt opgebouwd *(Intensity Modulated RadioTherapy (IMRT)/Volumetric Modulated Arc Therapy (VMAT))*. Daarnaast is er een flinke toename van *Magnetic Resonance Imaging*-gestuurde radiotherapie, zowel bij brachytherapie als uitwendige bestraling. Verder zijn er nieuwe ontwikkelingen, zoals *FLASH* en *GRID*-bestraling die nieuwe uitdagingen meebrengen voor dosimetrie. Hoewel de radiotherapie-instituten de patiënt-specifieke kwaliteitszorg grotendeels zelf verzorgen met commercieel-beschikbare hulpmiddelen, is er een blijvende behoefte aan een onafhankelijke validatie van de steeds complexere bestralingstechnieken.

In de nuclidentherapie zijn veelbelovende therapieën in ontwikkeling, waarbij een radiofarmacon ingezet wordt om kwaadaardige cellen te steriliseren. Deze oncologische behandeling valt wettelijk onder de noemer radiotherapie maar wordt op de afdeling nucleaire geneeskunde gegeven. De wettelijk verplichte dosisoptimalisatie is voor nuclidentherapie vele malen lastiger dan voor de conventionelere radiotherapie en de radiobiologie is nog volop in ontwikkeling. Voor deze vorm van therapie zullen mogelijk andere of extra maatregelen rondom de stralingsbescherming nodig zijn.

Daarnaast staat de ontwikkeling niet stil in zowel de radiologie als de nucleaire geneeskunde. Voor deze vakgebieden ontwikkelt de industrie steeds nieuwe apparatuur en reconstructiemogelijkheden die een lagere blootstelling aan de patiënt beloven bij gelijkblijvende beeldkwaliteit.

B.4.2 Overzicht Ioniserende straling

Met de watercaloriemeter heeft VSL momenteel een uiterst sterke positie wat betreft absolute dosimetrie voor uitwendige bestraling met radiotherapie. Daarnaast is VSL goed aangehaakt bij de nieuwe ontwikkelingen in de radiotherapie, zoals bestralingen met een extreem hoog dosistempo (>30 Gy/s) genaamd FLASH. Samen met andere metrologische instituten, gebruikers zoals HollandPTC en de relevante beroepsorganisatie ESTRO (*European Society for Radiotherapy and Oncology)* is een consortium opgezet, maar helaas heeft dit initiatief nog geen honorering gekregen in de EPM-call van 2023. Het blijkt lastig te zijn om financiering te krijgen voor onderwerpen waar VSL nog geen bewezen expertise heeft.

Daarnaast heeft de groep een gedegen reputatie als het gaat om *digital twins*, bijvoorbeeld het modelleren van ionisatiekamers met Monte Carlo technieken om diverse correctiefactoren te bepalen bij kleine-velden dosimetrie. Deze bevindingen worden gecontroleerd door betrouwbare metingen. Het ontwikkelen van *digital twins* voor FLASH dosimetrie en protonenbestraling met een *ridge filter* zal de ontwikkeling van deze nieuwe bestralingstechnieken ondersteunen.

Een wereldwijd onafhankelijke audit kan op diverse manieren worden verkregen, bijvoorbeeld via *de International Atomic Energy Agency, ESTRO*- en Nederlandse Commissie voor Stralingsdosimetrie-initiatieven en *Imaging and Radiation Oncology Core*. Deze audits worden veelal gedaan met een beperkt aantal meetpunten en een vrij grote onzekerheid in de meting. Omdat de klinische dosisverdelingen sterk gemoduleerd zijn in de ruimte, is een validatie op een beperkt aantal meetpunten in de regel niet voldoende. Meetapparatuur met een hogere resolutie en een kleinere onzekerheid zijn in de regel te duur om te transporteren voor een goede audit. Op vrijwilligersbasis wordt incidenteel het initiatief genomen om een audit uit te voeren met de meetapparatuur van een bepaald instituut maar dit is niet structureel of op afroep beschikbaar. Een erkende audit die wel op

afroep beschikbaar is en beter aansluit bij de klinische praktijk is zeer gewenst. Daarnaast zijn er nog weinig geschikte audits voor brachytherapie.

In Nederland is het gebruik van jodium-125 voor de behandeling van prostaatkanker tanende. Hoewel deze techniek nog niet geheel is verdwenen, lijkt het erop dat andere behandelvormen zoals (MRI-gestuurde) ge-hypofractioneerde radiotherapie en irridium-192 *focal* brachytherapie dit overnemen.

Met de opkomst van nuclidentherapie, zal de vraag naar absolute dosimetrie voor vloeistoffen waarin radioactieve nucliden zijn opgelost toenemen, zowel *in vitro* als *in vivo*, nabij of in de vloeistof en op korte (centimeters/decimeters) afstand. In de klinische praktijk zal de activiteitconcentratie, in 3D, gemeten worden met *PET en/of SPECT*-systemen. Hierbij moet mogelijk de dosisverdeling van een mix van nucliden bepaald worden, zoals een tracer dosis van jodium-124 gevolgd door een therapeutische dosis van jodium-131. Verder is betrouwbare kennis van de 3D dosisverdeling nodig voor de wettelijk verplichte dosisoptimalisatie en voor het uitwisselen van ervaringen tussen verschillende ziekenhuizen in Nederland en wereldwijd.
De prijs van radioactieve nucliden is sterk gerelateerd aan de gevraagde activiteit. Vooralsnog bepaalt de leverancier deze activiteit en hebben de ziekenhuizen zelf geen mogelijkheid deze onafhankelijk te controleren, anders dan met hun diagnostische apparatuur; verschillen van 10% zijn echter waargenomen. Zowel vanuit economisch perspectief als vanuit de vereiste kwaliteitszorg binnen de radiotherapie, zal er behoefte ontstaan voor een onafhankelijke controle van de activiteit.

Vanuit de afdelingen radiologie in de Nederlandse ziekenhuizen is traditioneel weinig belangstelling voor absolutie dosimetrie. De fabrikant neemt de verantwoordelijkheid voor de dosimetrie op zich en onafhankelijke controle hiervan is minder urgent. Tegelijkertijd is er een (goede) tendens om de blootstelling steeds verder te verlagen, zonder dat dit ten koste zou gaan van de beeldkwaliteit. Er zijn nog geen goede, objectieve methoden om de beeldkwaliteit van patiëntdata vast te stellen. Het is bekend dat de reguliere methoden (kwantificatie contrast en oplossend vermogen in fantomen) maar een beperkt inzicht geven in de klinische beeldkwaliteit. Een meer klinisch-relevante aanpak is radiologen hun mening te vragen voor een dataset van een bepaalde grootte. Dit is arbeidsintensief, duur en in grote mate subjectief. Objectieve methoden ter bepaling van de beeldkwaliteit kunnen ook helpen in het vaststellen van de minimaal benodigde activiteit voor nucleaire en radiologische scans en voor de beoordeling van de performance van moderne reconstructiealgoritmen, bijvoorbeeld gebaseerd op *machine learning*.

Met de aanschaf van een nieuwe kobaltbestralingsfaciliteit is de afdeling ioniserende straling (IO) weer helemaal bij de tijd. Echter, de huidige financiering van de metrologische basisinfrastructuur voor IO vindt deels nog plaats vanuit het Ministerie van Volksgezondheid, Welzijn en Sport (VWS), via de radiotherapie-instellingen. De geldstroom is complex en voor de radiotherapie-instellingen onvoldoende transparant, wat het lastig maakt om bijvoorbeeld financiering te verzorgen voor nieuwere vormen van radiotherapie zoals bovengenoemde nuclidentherapie die niet op de afdeling radiotherapie wordt gegeven. Daarnaast kan het gebrek aan transparantie begrijpelijke vragen oproepen bij de instellingen die een afdracht aan VSL moeten doen maar niet weten dat ze daarvoor indirect vergoed worden.

B.4.3 Aanbevelingen Ioniserende straling

Projectaanvragen bij externe financiers op onderwerpen waar nog onvoldoende ervaring is binnen het VSL, kunnen pas succesvol zijn als de onderzoeksgroep voorlopige resultaten kan laten zien, bij voorkeur gepubliceerd in wetenschappelijke tijdschriften. Voor IO kan gedacht worden aan *FLASH*, maar er zijn voor andere aandachtsgebieden vergelijkbare nieuwe ontwikkelingen, waar verkennend vooronderzoek nodig is. Vandaar de aanbeveling om financiële ruimte te creëren voor voorfinanciering van dergelijk, al dan niet risicovol, onderzoek. Er zal een structuur moeten komen om interne

aanvragen voor nieuwe, risicovolle te beoordelen. Dit maakt het mogelijk voor VSL om te diversifiëren. Een gehonoreerd project zou uitgevoerd kunnen worden met stagiairs, begeleid door de wetenschappelijk medewerkers die het project hebben voorgesteld.
Het VSL is erg goed gepositioneerd wat betreft de dosimetrie voor radiotherapie en moet die positie behouden. Echter, de EPM-financiering voor nieuwe activiteiten op dit onderwerp lijkt de laatste tijd minder vanzelfsprekend. Het verdient daarom de aanbeveling om naar andere financieringsbronnen te zoeken voor dergelijk, klinisch zeer relevant onderzoek. Dit sluit goed aan bij lopende initiatieven van VSL om bij meer geldschieters bekend te staan als kennisinstituut.

De stappen die ondernomen zijn om een kwalitatief superieure audit, waarbij een fantoom en hoge-resolutie dosimeter worden opgestuurd, te ontwikkelen beginnen vruchten af te werpen. Er lijkt ruim voldoende belangstelling te zijn in den lande. Het verdient de aanbeveling dit breed uit te rollen, de service kenbaar te maken bij de ESTRO en EORTC en te bezien of actieve werving buiten Nederland zinvol is. Deze werving zou kunnen via de plaatselijke overheidsinstellingen of samen met de lokale metrologische instituten. Het verdient sterk de aanbeveling op korte termijn deze *postal audit* uit te breiden naar een IMRT/VMAT-audit. Het geauditeerde instituut bepaalt welke behandeltechnieken ze willen laten auditeren, berekenen voor een representatief plan de dosisverdeling en stralen dit af op het geleverde fantoom met film *in situ*. Het VSL zal dan de gemeten dosis op film vergelijken met de aangeleverde, berekende dosis en voert vervolgens een zogeheten gamma analyse uit (met criteria voor relatieve dosis en afstandsverschil, zoals 2%/2 mm en de gamma-statistiek). Deze analyse kan gedaan worden met zowel de VSL-criteria als die van het geauditeerde instituut. Dit kan op termijn een accreditatiemiddel worden om mee te doen met bijvoorbeeld *European Organisation for Research and Treatment of Cancer*-studies.

Het is de verwachting dat absolute, onafhankelijke dosimetrie, voor de behandeling van prostaatkanker met jodium-125 zaadjes, af zal nemen, gezien het verminderde klinische gebruik hiervan binnen de radiotherapie. De bestaande service zou op niveau moeten blijven maar grote investeringen lijken vooralsnog niet opportuun. Wel kan het nuttig te zijn te onderzoeken of er behoefte is aan een dosimetrische audit voor Iridium-192 brachytherapie.
De expertise op het vlak van de dosimetrie voor nucleaire geneeskunde is nog bescheiden. Het contact dat IO is aangegaan met afdelingen nucleaire geneeskunde in Nederland is een zeer goede stap gezien de ontwikkelingen in dit vakgebied. De keuze om mee te doen met het groeifondsproject *'Decisive'* of vergelijkbaar is een verstandige stap in de goede richting. Op deze manier worden dosimetrie en herleidbaarheid in de gehele keten van nuclidentherapie goed op de kaart gezet. Verder zal in dit kader nut en noodzaak van referentie dosimetrie voor nucleaire geneeskunde onderzocht moeten worden. Betrouwbare en kwantitatieve kennis van de 3D dosisverdeling is noodzakelijk voor de verdere ontwikkeling van therapeutische nucleaire geneeskunde.

Het is te overwegen om via de opleiding tot coördinerend (stralings)deskundige structureel aandacht te geven aan dosimetrie, herleidbaarheid en onzekerheidsrekening. Bezie of bestaande contacten kunnen worden uitgebreid met afdelingen over de grens (prof. Baete, België) en met metrologische afdelingen elders in Europa, zoals het *National Physical Laboratory*, via het EPM-programma. Partners als VWS en Pallas zouden niet mogen ontbreken bij een op te zetten EPM-aanvraag of bij een aanvraag bij een andere financier. Daarnaast wordt sterk aanbevolen aansluiting te zoeken met het Prostaat Specifiek Membraan Antigeen-forum dat opgezet is door Nederlandse ziekenhuizen. Op deze manier kan VSL haar netwerk uitbreiden en kennis opdoen. Het werven van een opvolger van de huidige raadsvertegenwoordiger voor IO kan een goede gelegenheid zijn dit netwerk verder uit te breiden, bijvoorbeeld door EZK te vragen expertise en een netwerk in de dosimetrie bij nucleaire geneeskunde mee te laten wegen bij de selectie van een nieuwe kandidaat.

Er zijn momenteel onvoldoende, gevalideerde methoden om objectief de diagnostische beeldkwaliteit vast te stellen. Omdat beeldkwaliteit gerelateerd is aan de blootstelling en er een

noodzaak is deze blootstelling zo laag als redelijkerwijs mogelijk te houden, is het van belang een objectieve ondergrens voor de beeldkwaliteit te kunnen vaststellen. Probeer met de collega's van de afdeling DSM en de *machine learning* experts van de verschillende ziekenhuizen te onderzoeken of dit mogelijk is en waar financieringsbronnen liggen. Omdat de industrie (*CT*-scanners, *PET/SPECT*-scanners) hier naar alle waarschijnlijkheid in geïnteresseerd is, is een samenwerking aan te bevelen zolang volledige onafhankelijkheid gegarandeerd is. Instituten als het Radboud UMC (prof. Van Ginneken), het UMC Utrecht (prof. Van den Berg) en het Antoni van Leeuwenhoek (prof. Sonke, Dr. Teuwen) zijn actief op dit gebied, evenals de wetenschappelijke vereniging voor klinische fysica, NVKF, en de Federatie van Medisch Specialisten (Dhr. N. Veltman). Het is aan te bevelen de ontwikkelingen op dit vlak in de gaten te houden en indien nuttig te bespreken met de afdeling DSM van het VSL.

Naast de beeldkwaliteit is een verantwoorde vertaling van de toestel instelling (Dosis Oppervlakte product, Dosis Lengte Product) naar blootstelling in millisievert (mSv) van belang voor de registratie van de blootstelling aan de bevolking en het modelleren van de schadelijke effecten hiervan. Ontwikkelingen op dit vlak kunnen interessant zijn voor het VSL en het verdient de aanbeveling om, onder andere op dit vlak, contact te onderhouden met het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu.

Het aandeel van VWS voor de basisfinanciering van een deel van de IO-infrastructuur zal verder geformaliseerd moeten worden. Vervolgens zal met VWS en de afdelingen nucleaire geneeskunde gekeken moeten worden op welke wijze er basisfinanciering kan komen voor metrologische standaarden speciaal voor nuclidentherapie en het opzetten en onderhouden voor een IO-infrastructuur hiervoor. Bij deze gesprekken is het goed te beseffen dat de afdeling flow en lengte ook medische toepassingen hebben. Dit zijn bijvoorbeeld het bepalen van de doorbloeding (perfusie) als onderdeel van diagnostiek en de bepaling van de lengte van partikels, gebruikt bij radio-embolisatie. Het is aan te raden hier zowel het veld als de grootste structurele financier EZK bij deze gesprekken te betrekken.

B.5 Massa en gerelateerde grootheden

B.5.1 Achtergrond Massa

Een essentiële ontwikkeling betreffend het meten van massa is de wijziging van de definitie van de kilogram op 20 mei 2019. De definitie aan de hand van het artefact werd verlaten en vervangen door het vastleggen van de constante van Planck. De realisatie vindt nu plaats door middel van een zgn. Kibble-balans waarmee een massa kan worden gerealiseerd door een combinatie van (quantum) standaarden van stroom, kracht en verplaatsing. Zo'n fundamentele balans is wereldwijd in slechts enkele laboratoria voorhanden. Een van de essentiële wijzigingen is dat niet langer alleen de 1 kg fundamenteel is vastgelegd, maar dat in principe elke massa op een fundamentele wijze kan worden bepaald.

Voor de nationale situatie betekent dit dat het Platina-Iridium massastuk dat voorheen de Nederlandse kilogram definieerde niet langer wezenlijk is voor de herleidbaarheid. De interne standaarden worden nu gekalibreerd en afgeleid van twee stalen 1 kg massastukken waarvan de juiste massa met een onzekerheid van 21 µg bij het *Bureau International des Poids et Mesures* wordt vastgelegd.

Kalibraties worden uitgevoerd om de herleidbaarheid te waarborgen van meetapparatuur voor de Nederlandse industrie. Kalibraties worden uitgevoerd voor intern VSL gebruikt, met name chemie, volumetrie en druk, en externe klanten in de farmacie en industrie.

B.5.2 Overzicht Massa

VSL kalibreert en justeert massastukken van klasse M1 tot en met klasse E1, waarbij de conventionele massa, de ware massa en de Newtonische massa kunnen worden vastgesteld. De kalibratie-scope omvat nu de kalibratie van stalen massastukken van 1 mg t/m 20 kg met een onzekerheid lopend van resp. 0.6 µg tot 10 mg; dit is voldoende voor de kalibratie van genoemde klassen massastukken.

Voor de realisatie van deze faciliteiten beschikt het VSL over het primaire kilogram #53, referentie-sets stalen massastukken en diverse balansen, waaronder met name een Radwag RMC1000 weegrobot voor massastukken tussen 10 g en 1 kg. Deze faciliteiten vereisen onderhoud en periodieke (her-)kalibraties.

B.5.3 Aanbevelingen Massa

Massameting is van fundamenteel belang in veel aspecten van de metrologie. Daarom is zorgvuldig beheer en het in stand houden en ontwikkelen van de competenties en faciliteiten essentieel. De huidige faciliteiten zijn voldoende voor de nabije toekomst en mogen niet ter discussie staan. Het binnen de grenzen van de aanwezige apparatuur verlagen van de onzekerheden via deelname aan *key-comparisons* wordt aangemoedigd.

Het VSL dient alert te zijn op mogelijke vragen in de toekomst voor herleidbaarheid tot aan 1000 kg.

Gezien de enorme investeringen en de geringe meeropbrengst is de realisatie van een Kibble-balans in Nederland vooralsnog niet aan de orde.

B.5.4 Achtergrond Dichtheid

Dichtheidsmeting van vloeistoffen wordt gedaan voor de herleidbaarheid van druk (binnen en buiten VSL), *gasflow* en *waterflow*. Daarnaast wordt dubbel gedestilleerd water met een gecertificeerde dichtheid geleverd aan externe gebruikers.

metingen bestaan uit massabepalingen in combinatie met gekende eigenschappen van (dubbel gedestilleerd) water. De metingen bestaan vooral uit nauwkeurige toepassingen van bekende principes, ook internationaal zijn hierin geen baanbrekende ontwikkelingen.

B.5.5 Overzicht Dichtheid

De meetstandaarden in dit vakgebied bestaan uit een faciliteit voor het maken van dubbel-gedestilleerd water en een Anton Paar DMA 5000 M dichtheidsmeter. Voor overige metingen zijn de standaarden zoals genoemd onder massa relevant.

B.5.6 Aanbevelingen Dichtheid

Aanbevolen wordt deze faciliteiten in stand te houden en de markt te verkennen voor verdere kalibratie-mogelijkheden met de beschikbare – en reeds beheerde - apparatuur. Gedacht kan worden aan de kalibratie van pycnometers en areometers.

B.5.7 Achtergrond Druk

Drukmetingen leveren belangrijke informatie in verschillende situaties. Denk aan het vaststellen van de vlieghoogte van vliegtuigen. Ook bij weersvoorspellingen en het sturen van processen is druk een wezenlijke grootheid. Drukmeting is een meting die op het hoogste niveau bij nationale standaardenlaboratoria wordt uitgevoerd, daar is de herleidbaarheid tot kracht (via massastukken) en oppervlak (geometrische meting van een diameter) intern voorhanden. Hierbij is kennis van de lokale valversnelling wel noodzakelijk.

Op het gebied van druk werkt VSL onder meer voor de procesindustrie, gezondheidszorg, olie- en gasindustrie, en voor analytische en chemische laboratoria. Daarnaast worden kalibraties geleverd aan (geaccrediteerde) instellingen die drukbalansen en drukmeters gebruiken

B.5.8 Overzicht Druk

De beheerde meetstandaarden zijn:

- 15 piston-cilinder combinaties, waarvan er jaarlijks 3 worden gekalibreerd
- Drukbalansen (gas), bereik van -0,01 tot 20 MPa
- Drukbalansen (olie), bereik tot 500 MPa
- Lage-drukstandaard FRS4
- Vacuümopstelling.

Hiermee worden de volgende kalibratiefaciliteiten gerealiseerd:

- Absolute gasdruk van 5 kPa – 20 MPa
- Overdruk, verschildruk en onderdruk van gassen
- Absolute oliedruk van 1 MPa – 500 MPa
- Relatieve oliedruk

Om in te spelen op de toenemende vraag naar kalibraties onder 8500 Pa en om voor VSL een hoog-waardige positie te behouden, is een lage-drukstandaard opgebouwd. Deze is in 2023 in gebruik genomen.

B.5.9 Aanbevelingen Druk

Aanbevolen wordt de huidige faciliteiten minimaal te beheren en te handhaven en aandacht te besteden aan het herleidbaar (en onder accreditatie) kunnen kalibreren van lage drukken t/m vacuüm. Er is vermoedelijk vraag uit de markt naar het meetbereik lopend van 10^{-5} Pa tot 2 Pa.

Voor de lokale zwaartekrachtsversnelling is men in Nederland afhankelijk van een faciliteit bij de TU Delft en berekeningen volgens bepaalde modellen. De afdeling van de TU Delft die aangewezen is om de absolute gravimeter te beheren doet mee aan (EURAMET-) ringvergelijkingen die de waarde en onzekerheid waarborgen. Hoewel dit niet onder een formele erkenning valt verschilt deze situatie niet van die in de meeste Europese landen en dit leidt niet tot problemen. De procedures voor de bepaling van druk en kracht uit gekalibreerde massastukken zijn vervat in een document “De sterkte van het zwaarteveld in Nederland”, uitgegeven door de technische commissie van de gezamenlijke erkende laboratoria voor druk. De Raad beveelt het VSL aan te bevorderen dat hieromtrent namens, of via het VSL, een referentiedocument verschijnt, bijvoorbeeld als NEN-NPR richtlijn.

B.5.10 Achtergrond Viscositeit

De viscositeit, ofwel de stroperigheid van een vloeistof of gas, is van belang belangrijk voor diverse aspecten in dagelijks gebruik en ook in productieprocessen. Bijvoorbeeld moet verf niet te dik en niet te dun zijn, smeerolie goed smeren etc.

Voor het direct meten van viscositeit zijn diverse methoden voorhanden. Voor de kalibratie van deze methoden is het van belang dat referentie-vloeistoffen beschikbaar zijn met bekende viscositeit.

VSL levert referentievloeistoffen materialen en kalibraties op het gebied van viscositeit aan onder meer de farmaceutische industrie, chemische industrie, productiebedrijven en (geaccrediteerde) laboratoria over de hele wereld.

De basis voor alle viscositeitsmetingen is de internationaal vastgestelde viscositeit van dubbelgedistilleerd water. Met dit water en steeds viskeuzere vloeistoffen leidt VSL de constanten van zijn Ostwald viscosimeters af, die op hun beurt weer gebruikt worden om de viscositeit van onbekende vloeistoffen en referentiematerialen te bepalen. Het VSL is in Nederland de enige instelling met een ISO/IEC 17025:2017 RvA-accreditatie voor viscositeit.

B.5.11 Overzicht Viscositeit

Behalve de faciliteit voor het maken van dubbel gedestilleerd water zijn van belang de Ostwald-viscositeitsmeters en de thermostaatbaden. Deze behoeven periodiek onderhoud en kalibratie.

B.5.12 Aanbevelingen Viscositeit

Hoewel een bijzonder nuttige en relevante meting, staat deze faciliteit ietwat los van het realiseren van standaarden op basis van het SI-stelsel. Er zijn, hoewel niet in Nederland, partijen die deze faciliteit en referentievloeistoffen op commerciële basis kunnen aanbieden. De kosten van interne kalibraties om deze faciliteit in stand te houden die aan EZK worden doorberekend zijn relatief hoog. Daarom wordt aanbevolen te bezien of deze faciliteit op commerciële basis, d.w.z. zonder EZK-bijdragen, in stand kan worden gehouden, dan wel dat klanten naar andere partijen worden doorgeleid.

B.6 Lengte

B.6.1 Achtergrond Lengte

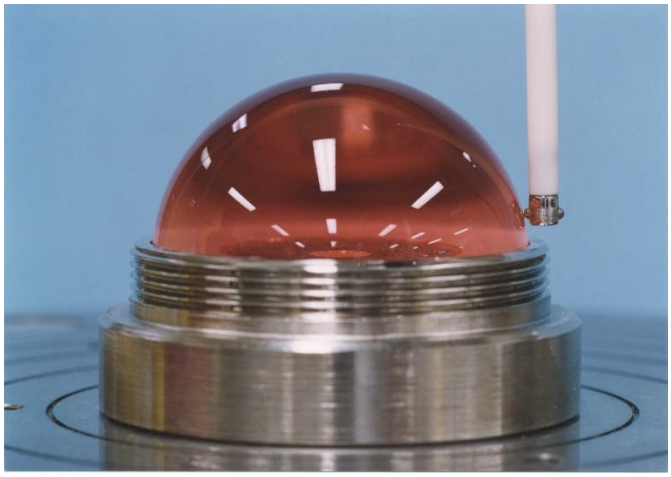
Lengtemeting omvat een grote diversiteit aan metingen van verplaatsingen, afstanden, dimensies, vormen etc. Binnen het VSL is de volgende indeling gemaakt die we hier zullen volgen:

- Optische frequentiestandaarden
- Eindmaten
- Geometrie
- Nanometrologie

Traditioneel speelt het vakgebied Lengte een belangrijke rol in het leveren van herleidbaarheid voor de hoogwaardige maakindustrie in Nederland. Deze wordt behalve door het VSL ook bediend door (RvA-erkende) kalibratielaboratoria waar de grote meerderheid aan kalibraties plaatsvindt. Het VSL speelt hierin een essentiële rol door het kalibreren van referenties en meetapparatuur.

Internationaal gezien is de frequentiekam die de verbinding met de tijdsstandaard vormt relatief nieuw, hiervan worden nog steeds nieuwe toepassingen onderzocht. Met de miniaturisering in met name de chip-industrie is de nanometrologie essentieel. Ontwikkelingen hierin zijn het grondig toepassen van het modelleren van verstrooid licht zodat structuren onder de optische diffractielimiet toch kunnen worden gemeten. Bij onzekerheden in de µm-schaal en groter zien we industriële toepassingen van strepen-projectie systemen en laser scanners die grote hoeveelheid gegevens verwerken waarbij behoefte aan herleidbaarheid en onzekerheidsanalyse toe zal nemen. Een andere relatief nieuwe ontwikkeling is de ontwikkeling van XCT (*X-ray Computed Tomography*) waarbij interne maten en overgangen tussen verschillende materialen binnen objecten kunnen worden gemeten met een nauwkeurigheid die de traditionele CMM (Coördinaten MeetMachine) benadert en een veel hogere meetpuntdichtheid kan geven.

Het VSL is aangesloten op de ontwikkelingen binnen de nano-metrologie door te investeren in onderzoek om ook herleidbaarheid te kunnen bieden op nanometerschaal. Dit is de focus van het onderdeel nanometrologie. Hierbij worden voornamelijk geavanceerde optische technieken gebruikt, zoals scatterometrie, ptychografie en flowcytometrie. De toepassingen liggen op het gebied van de halfgeleiderindustrie, maar ook in metingen van nanodeeltjes in het kader van milieu en gezondheid.



Figuur 6.1 Nauwkeurige kalibratie van een rondheidsstandaard.

B.6.2 Overzicht Lengte

Optische frequentie/golflengte standaarden:

- Frequentiekam
- 3 jodium-gestabiliseerde Helium Neon (HeNe)-lasers
- 3 gestabiliseerde HeNe-lasers (rood, geel en groen) voor eindmaatinterferometers
- Faciliteit voor het vergelijken van laserfrequenties
- 6 laserinterferometers t.b.v. verplaatsingsmetingen

Eindmaten en kalibratie daarvan:

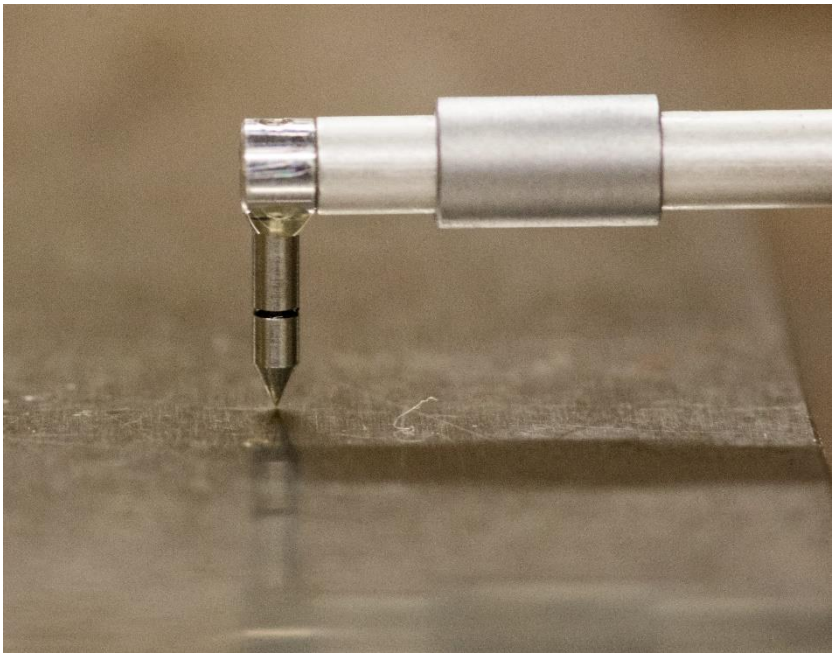
- 2 Kösters eindmaatinterferometers voor eindmaten < 100 mm (Zeiss)
- 1 Twymann-Green lange eindmaatinterferometer (Eigen bouw) voor eindmaten 100-1000 mm)
- Randapparatuur voor eindmaatinferometers: temperatuurmeetstations, barometer, koolstofdioxide-meter, relatieve luchtvochtigheidsmeter
- 2 eindmaatcomparators
- Kogelmeetapparaat om kogels met een eindmaatinterferometer te kunnen meten
- Referentie vlakken en (eind-) maten
- 1 set metrisch kort staal
- 1 set metrisch kort hard metaal
- 1 set *inch* staal
- 1 set metrisch lang staal
- 1 set *inch* lang staal
- 1 set t.b.v. kalibratie comparator
- 30 vlakglazen
- 4 stuks metalen vlakplaten vierkant
- 2 stuks metalen vlakplaten rond
- 1 stuks keramische vlakplaat rond
- Set referentiekogels

Geometrie:

- 3D-CMM met hulpstandaarden en randapparatuur: temperatuurmeetstation, barometer, vlakke spiegel, eindmaat 10 mm, set ring- en penkalibers, elektronische waterpas, haakheidszuil, stappeneindmaat
- Rondheidsmeter met rondheidsstandaard
- ULM lengtemeetbank
- Streepmaatopstelling 1020 mm, met hulpstandaarden en randapparatuur: temperatuurmeetstation, barometer, luchtvochtigheidsmeter, precisielinialen
- 50-meterbank, met hulpstandaarden en randapparatuur: barometer, laserinterferometer
- Kleine hoekgenerator, met hulpstandaarden en randapparatuur: temperatuurmeetstation, 2 autocollimatoren, 4 elektronische waterpassen
- 2 hoekverdeeltafels
- Polygonen: 7- 12- en 36- zijdig
- Randapparatuur voor gebruik op locatie: temperatuurmeetstation, luchtvochtigheidsmeter

Nano-metrologie:

- Jena Interferentiemicroscoop met staphoogte-standaarden
- Fizeau Interferometer met referentievlakglazen
- Digitale Piezo Translator (DPT)
- Single and multiwavelength optical scatterometers, ptychographische systeem



Figuur 6.2 Ruwheidstaster meet oppervlak

B.6.3 Aanbevelingen Lengte

Op dit moment is de huidige zelfgebouwde frequentiekam wegens ouderdom niet meer functioneel en loopt er een proces om deze te vervangen door een nieuwe, commercieel verkrijgbare frequentiekam. Deze investering wordt noodzakelijk geacht om de lengtemeting te kunnen blijven herleiden naar het meest primaire niveau.

Als noodzakelijk te onderhouden faciliteiten worden daarnaast in elk geval beschouwd:

- Kalibratie van verplaatsings-laserinterferometersystemen
- Eindmaatmeting d.m.v. interferometrie t/m 1000 mm
- Kogelmeting d.m.v. (eindmaat-) interferometrie
- Streepmaatmeting t/m 1000 mm
- Meting van binnen- en buitendiameters met een onzekerheid ≤ 0.2 µm
- Kalibratie van rondheidsstandaarden
- Kalibratie van staphoogte-standaarden
- Kalibratie van kleine verplaatsingen op (sub) nm-niveau
- Kalibratie van optische vlakheid m.b.v. Fizeau-interferometer
- Genereren van kleine en grote hoeken en kalibratie van instrumenten en standaarden hiermee

Gezien de uitgebreidheid van de scope en de faciliteiten kan het nodig zijn enkele faciliteiten te laten vervallen waar weinig vraag naar is of waar voldoende overlap is met erkende kalibratielaboratoria in Nederland.

Het onderzoek in de genoemde nm-metrologie dient te worden voortgezet, zodat dit tot een kalibratie-faciliteit kan leiden zodat metingen van dunne films en 1D en 2D periodieke structuren

herleidbaar kunnen worden uitgevoerd. De kalibratie van laserinterferometer-systemen moet worden uitgebreid naar infrarood-golflengten indien daar vraag naar komt; hierin kan het VSL vooroplopen.

Voor technieken waarbij grote hoeveelheid 3D meetdata worden verwerkt zoals *fringe*-projectie, laserscanners en XCT-systemen zal het VSL moeten bezien of ze hierin een rol op zich kunnen nemen, wellicht in samenspraak met de DSM groep.

Optische dimensionele meettechnieken blijven de enige haalbare mogelijkheid voor in-line, snelle en niet-invasieve dimensionale metrologie, wat een belangrijk onderdeel is van de fabricageketen van chips. Dit is vereist omdat alleen via optische metrologie de benodigde hoge precisie en hoge resolutie (ruim onder de kritische dimensie van 20 nm) kan worden bereikt. Elektronische chips maken de transitie naar een energie-efficiënte en gedigitaliseerde samenleving mogelijk en het is van cruciaal belang dat een nationaal metrologie instituut als VSL hierin een rol speelt, aangezien Nederland het wereld leidende bedrijf huisvest in de productie van lithografische scanners. De huidige activiteiten op het gebied van optische scatterometrie, ptychografie, zijn een aanzet geweest om daar een rol te spelen, die versterkt moet worden door een lange termijnplan en door het verbinden van de belangrijkste speler in Nederland, zowel met het bedrijfsleven als met de academische wereld.

B.7 Temperatuur en Luchtvochtigheid

B.7.1 Achtergrond Temperatuur en Luchtvochtigheid

Inleiding

Temperatuurmetingen zijn in vrijwel alle industrieën van groot belang. De daarmee verbonden temperatuurstandaarden vormen tevens de basis voor vele andere metrologische gebieden zoals Volumetrie en Chemie en zijn daarom niet los te zien van de gehele metrologische infrastructuur in Nederland. Samenwerking in multidisciplinaire teams en het op maat maken van de technologie voor specifieke toepassingen (*fit-for-purpose*) is essentieel. Ontwikkelingen op het gebied van temperatuurmeting komen voort uit de vraag van met name de energietransitie en klimaat, alsmede het realiseren van op natuurconstanten gebaseerde grootheden.

Doelstelling

De doelstelling van het vakgebied Thermometrie en Vochtigheid is om de benodigde herleidbaarheid aan de andere standaarden van VSL te leveren en om de Nederlandse industrie te bedienen met meetfaciliteiten in relevante temperatuur- en luchtvochtigheidsbereiken en bijbehorende meetonzekerheden. Dit is een stabiele markt, die is opgebouwd uit bedrijven, kalibratielaboratoria, universiteiten, onderzoeksinstituten en ziekenhuizen. De problemen die zijn ontstaan na het verhuizen naar het nieuwe laboratorium zijn overwonnen, de kalibraties voor klanten zijn weer op het oude niveau hervat, en er zijn nieuwe gemotiveerde medewerkers geworven.

Energietransitie

De energietransitie creëert behoefte voor thermometrie en vochtigheidsmetingen. Bijvoorbeeld, het meten van de temperatuur in energiecentrales middels fiberoptica, het meten van de temperatuur van vloeibaar (cryogeen) waterstof -254 °C) en *Liquefied natural gas (LNG)*, en het meten van vocht en zuiverheid van door electrolysers geproduceerde waterstof (*trace gas analysis*). Ook dynamische temperatuurmeting, zoals b.v. in verbrandingsmotoren en elektrische energieconversie, is een aspect waar rekening mee moet worden gehouden.

Klimaat

Veranderingen in het klimaat bieden kansen voor thermometrie. Het gaat hierbij om het over langere tijd (jaren) zeer stabiel (< mK) meten van de temperatuur van het zeewater en van de luchttemperatuur boven land. VSL zou zich kunnen oriënteren op het participeren in (inter)nationale (NWO-) projecten, b.v. geleid door het KNMI.

Technologie

De bestaande meettechnologieën voor (weerstands)thermometrie hebben ieder zo hun beperkingen. O.m. bij het NIST wordt daarom gekeken naar alternatieven zoals o.a. thermometrie gebaseerd op fotonica en thermometrie gebaseerd op het meten van de *Johnson noise*.

Fotonische temperatuursensoren zijn gebaseerd op de manier waarop warmte de dimensionale en thermo-optische eigenschappen van geminiaturiseerde fotonische resonatoren, zoals ringresonatoren, verandert, waardoor een optisch filter ontstaat waarvan de spectrale kenmerken een gevoelige temperatuurmaat zijn.

Johnson-noise thermometers leiden de thermodynamische temperatuur af uit metingen van de thermisch geïnduceerde stroomfluctuaties die optreden in alle elektrische geleiders.

B.7.2 Overzicht Temperatuur en Luchtvochtigheid

Volgens de K999 scope d.d. 07-02-2024 (https://www.rva.nl/alle-geaccrediteerden/k999/) bestrijken de kalibratiefaciliteiten van het VSL het temperatuurbereik van -200 °C tot en met +1550 °C, met een onzekerheidsbereik van 0,1 mK tot 3,5 °C.

Volgens de K999 scope d.d. 07-02-2024 (https://www.rva.nl/alle-geaccrediteerden/k999/) bestrijken de kalibratiefaciliteiten van het VSL het vochtigheidsbereik van 12%RH tot en met 95%RH, met een onzekerheidsbereik van 0,23%RH tot 0,87%RH (in het temperatuurbereik van -9 °C tot en met 70 °C bij atmosferische druk), en *trace humidity* van 3 µmol/mol tot 10.000 µmol/mol met een onzekerheidsbereik van 0,3% tot 4,7%.

VSL kan de volledige ITS-90 schaal afdekken middels de vaste tripelpunten (Ar, Hg, Tripel Punt Water (TPW), Ga, In, Sn, Zn, Al, Ag). Er is behoefte aan een additionele Cu-cel. Deze kan worden verkregen doorzelfbouw of inkoop (bv via *Fluke*).

B.7.3 Aanbevelingen Temperatuur en Luchtvochtigheid

Het *National Institute of Standards and Technology* (NIST) werkt aan fotonische en *Johnson-noise* temperatuurmeting. Met beide principes wordt rechtstreeks de thermodynamische temperatuur gemeten en vervalt mogelijk de behoefte aan kalibratie van de primaire standaarden. De aanbeveling is om beide technologieën te onderzoeken, eventueel in een *EMRP* project, op hun haalbaarheid en potentiële toegevoegde waarde voor VSL en de BV Nederland.

Gezien de te verwachten marktgroei in toepassing van vloeibaar waterstof en LNG in Nederland ontstaat de behoefte om het geaccrediteerde temperatuurbereik uit te breiden naar tenminste -254 °C.

Het meten van vocht in door electrolysers geproduceerde waterstof (*trace gas analysis*, bepaling van *enhancement* factoren) wordt een belangrijke toekomstige markt. Het verdient derhalve aanbeveling om een faciliteit te realiseren waarmee de waterconcentratie in waterstof gemeten kan worden.

Ingegeven vanuit de *automotive* industrie kan het ontwikkelen van een opstelling en meetmethode voor het kalibreren van dynamische temperaturen opgepakt worden. Mogelijk zou dit vanuit een EMRP project gerealiseerd kunnen worden.

Ook veranderingen in het klimaat creëren behoefte voor thermometrie. Het verdient derhalve aanbeveling om te participeren in (inter)nationale projecten waarin apparatuur wordt ontwikkeld waarmee over langere tijd (jaren) zeer stabiel (< mK) de temperatuur van het zeewater en van de luchttemperatuur boven land gemeten kan worden.

B.8 Optica

B.8.1 Achtergrond Optica

Ingegeven vanuit behoefte uit de markt ontwikkelt het vakgebied radiometrie en fotometrie op Nationaal Metrologisch Instituut (NMI)-niveau zich volgens twee hoofdlijnen: 1) Radiometrie voor de hightechsector, met toepassingen in het ruimteonderzoek en klimaatverandering, 2) Energiezuinige verlichting en gezondheid.

Radiometrie voor de hightechsector ziet een grote impuls in de ontwikkeling van geavanceerde instrumenten en methoden voor de ruimte- en aardobservatiesector, waar metrologie bijdraagt aan de kalibratie van transferstandaarden, zowel op detectorbasis (Silicon, InGas) als opkomende technologieën gebaseerd op nanogestructureerde materialen, zoals zwart-silicium en bronnen. Aan de bronzijde wordt verwacht dat de traditionele bronstandaarden (FEL-lampen, halogeenlampen) binnen enkele jaren zullen verdwijnen. Hoewel er behoorlijk wat moeite is gestoken in het definiëren van gelijkwaardige vervanging op basis van LED-technologieën, is de weg om dat te bereiken nog lang, gezien de verschillende aard van de straling die door gloeilampen wordt uitgezonden in vergelijking met op *solid-state* gebaseerde lichtbronnen.

B.8.2 Overzicht Optica

Op dit moment beschikt VSL over een primaire herleidbaarheidsketen voor detectoren op basis van een absolute cryogene radiometer, die het spectrale bereik van 190 nm tot 2500 nm bestrijkt. Dit systeem is vele jaren in bedrijf, en nadert het einde van haar levensduur, waardoor vervanging door een nieuwe generatie radiometer dan wel de realisatie van een alternatief aan de orde is.

Aan de bronzijde verkrijgt VSL zijn herleidbaarheid van het NIST via FEL-lampen. Daarnaast zijn er verschillende meetinstrumenten beschikbaar om de transmissie van filters en de respons van een fotometer te karakteriseren. Er zijn ook relatief nieuwe faciliteiten gebouwd en methoden ontwikkeld om de niet-lineariteit van detectoren en systemen te karakteriseren, LED-bronnen te karakteriseren in termen van hun temporele respons, evenals nieuwe radiometers gebaseerd op array-spectrometers.

B.8.3 Aanbevelingen Optica

Het behouden van een nauwkeurige realisatie voor detectoren is cruciaal, zeker in het huidige spectrumbereik dat varieert van 190 nm tot 2500 nm, vanwege de relevantie ervan voor de kalibratie van sensoren en array-detectoren in het zichtbare bereik en *near*-infrarood. Deze worden gebruikt in vision-systemen, fotometrische apparaten en in sensoren die worden gebruikt bij *earth-monitoring* en -observatie, waarbij langere golflengten in het IR vaak worden gebruikt. We bevelen aan naar een mogelijkheid te zoeken de absolute cryogene radiometer te vervangen. dan wel een voldoende nauwkeurig alternatief te realiseren. Vervanging zal een grote investering vragen waarvoor aparte financiering zal moeten worden gezocht; gezien de beperkte vraag uit de markt lijkt dit niet gerechtvaardigd. Het VSL heeft de vervanging en haar alternatieven uitgebreid onderzocht; het VSL-rapport hieromtrent kan als leidraad dienen, waarbij het genoemde ‘reworking VSL’s traceability chain’ het meest opportuun lijkt. Het uitbreiden van het golflengtebereik naar korte en langere golflengten moet worden besproken. Kortere golflengten (zoals EUV) kunnen lastig zijn, maar worden in veel toepassingen steeds relevanter. We bevelen aan dat het VSL met een plan komt om hierin samen te werken met bestaande Nederlandse organisaties (zowel bedrijven als de academische wereld), en eventueel te denken aan het delen van faciliteiten.

De uitbreiding naar langere golflengten (boven 2500 nm, bijvoorbeeld tot 5 µm) zou de behoefte aan een (nationale) meetstandaard kunnen creëren en daarmee mogelijkheden openen voor verder kalibratiewerk voor de ruimtevaartsectoren. Dit moet ook serieus worden overwogen.

Op het gebied van klimaat en milieu heeft VSL de afgelopen vijf jaar relevante ervaring opgedaan met de kalibratie van arrayspectroradiometers. Deze apparaten vinden een toenemend gebruik voor klimaatmonitoring en aardobservatie. VSL moet de capaciteiten op dit gebied behouden en op zoek gaan naar uitgebreider toepassingsgebied. Tot slot heeft VSL in het recente verleden waardevolle ervaring opgebouwd op het gebied van metrologie voor verlichting en gezondheid. Wij raden aan om door te gaan met deze activiteiten en de betrokkenheid bij de nationale industrie en belanghebbenden in deze sectoren verder te versterken.

B9. Volumetrie

B.9.1 Achtergrond Volumetrie

Inleiding

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

De activiteiten op het gebied van waterflow en LNG zijn ondergebracht in het *European Center for Flow Measurement* op de Maasvlakte. Daar bevinden zich twee faciliteiten voor waterstroming, voor respectievelijk een debiet tot 650 m^3/h en 2500 m^3/h. De faciliteiten voor LNG bestaan uit de primaire standaard, waarvoor het beheer betaald wordt vanuit het programma, en de *mid-scale* faciliteit die niet publiek gefinancierd wordt.

Samenwerking in multidisciplinaire teams (met o.m. Chemie, Thermometrie) is essentieel. Dit omdat, naast het meten van de flow op zich, ook de samenstelling, concentratie, zuiverheid en hoeveelheid vocht in het stromende medium moet worden bepaald. Ontwikkelingen op het gebied van flowmeting komen voort uit de vraag van met name de energietransitie, klimaat en gezondheidszorg.

Energietransitie

Nederland is met de afbouw van gaswinning in Groningen en het leegraken van de kleine velden al sinds 2018 importland geworden van aardgas. Voor olie was dat altijd al het geval. Hoewel er veel wordt geïnvesteerd in zon- en windenergie, is de verwachting dat ook in de toekomst Nederland importland voor energie blijft. Bovendien is en blijft Nederland belangrijk doorvoerland voor energie naar de ons omringende landen. De haven van Rotterdam en Amsterdam spelen hierin een belangrijke rol. Veel energiedragers worden in Nederland geïmporteerd, geblend en weer doorgevoerd via deze havens: aardgas in de vorm van LNG, waterstof gasvormig of in de vorm van vloeibaar waterstof (LH2) of ammoniak (NH3). Bij aankomst in de haven van Rotterdam moet de hoeveelheid van schip naar opslag worden gemeten met flowmeters. Ook wordt gemeten of er geen emissie van H2 of NH3 plaatsvindt. Daarna vindt het transport plaats naar de plek van gebruik, via binnenvaart schepen of pijpleidingen. Het eindgebruik van de energiedragers is b.v. als bouwsteen voor kunstmest of andere chemische verbindingen, of als brandstof in b.v. auto's, bussen of maritiem (mobiliteit). In alle schakels in de keten is het essentieel dat het debiet, de hoeveelheid, zuiverheid en samenstelling van de energiedragers nauwkeurig wordt gemeten. Afhankelijk van de toepassing van de energiedrager kan de samenstelling en zuiverheid kritisch zijn, wat nieuwe uitdagingen stelt aan de metrologie wat betreft volume, range en chemische samenstelling.

Daarnaast zit er veel unieke en concurrentiegevoelige kennis van de energiedragers bij de eindgebruikers, b.v. in de chemische industrie. Om alle schakels in de keten goed op elkaar te kunnen laten aansluiten zou VSL een rol op zich kunnen nemen als *"trusted advisor",* waaraan de individuele kennis kan worden overgedragen en aldus kan worden geborgd.

Klimaat en milieu

Het monitoren van de uitstoot en concentratie van broeikasgassen (koolstfodioxide, methaan, zwavelhexafluoride, chloorfluorkoolwaterstoffen, etc) en stikstofverbindingen (o.a. stikstofoxiden, ammoniak) was altijd al een belangrijk aandachtsgebied voor VSL. Maar met nieuwe energiedragers zoals waterstof en ammonia is het meten van emissies van blijvend belang. Ook strengere eisen t.a.v.

stikstof emissies kunnen impact hebben op de inzet van ammonia als waterstof drager voor transport of inzet als transportbrandstof in de scheepvaart of inzet bij elektriciteitscentrales. Monitoring van emissies gebeurt ook steeds vaker door gebruik van drones en satellieten of met gedistribueerde sensoren, die met een *smart grid* verbonden zijn. In dit gebied waar volumetrie, chemie en *data science and management* bij elkaar komen ontstaan nieuwe kansen voor VSL.

Om emissies van CO2 te reduceren worden er plannen gemaakt om koolstofdioxide af te vangen en op te slaan in lege gasvelden. Dit gebeurt o.a. in het Porthos en Aramis project, wat zorgt voor koolstofdioxide-reductie door opslag onder de Noordzee. Zowel de zuiverheid als volume van koolstofdioxide moet nauwkeuring worden gemeten net als eventuele lekkages.

Gezondheidszorg

Er is vraag naar het herleidbaar meten van bloedflow in de aderen, alsmede van eventuele deeltjes in het bloed. Een andere toepassing is het tijdens beademing real-time meten van de aanwezige gassen in de in- en uitgeademde lucht.

Technologie

De *low-flow* installatie (een ijkbuis, piston prover) heeft een basisonzekerheid van 0,20%. Deze kan worden gereduceerd naar 0,15% met geometrische afleiding van het volume van de ijkbuis.
Naast het meten van de flow op zich is er ook steeds meer behoefte aan het meten van de samenstelling, concentratie, zuiverheid en hoeveelheid vocht in het stromende medium. Dit kan m.b.v. de zogeheten multiparameter technologie, waar aan de hand van additioneel gemeten parameters als dichtheid, viscositeit, warmtecapaciteit e.d. o.m. de samenstelling van het stromende medium kan worden vastgesteld.`

De LNG installatie (-161°C) is geschikt voor het kalibreren van cryogene vloeistoffen. In de toekomst gaan cryogene vloeistoffen een belangrijke rol spelen voor grootschalig transport van energie, zoals vloeibaar waterstof LH2 (-253°C), ammonia (-33°C). Er is in de wereld nog geen standaard op het gebied van LH2, terwijl de verwachting is dat in de toekomst grote volumes LH2 over de wereld worden getransporteerd als duurzaam alternatief voor LNG.

Er is nog geen primaire standaard voor het meten van pure waterstofgas flow op druk. De *Gas-Oil Piston Prover (GOPP)* zou hier mogelijk geschikt voor kunnen worden gemaakt. De waterstof *backbone* die op dit moment door de Gasunie wordt ontwikkeld zal opereren bij een druk van 30-50 bar, in een later stadium, en offshore, wellicht nog hoger. Energiestromen zullen vergelijkbaar zijn met aardgas, maar gassnelheden significant (tot 3x) hoger. De leidende historische rol die VSL heeft gespeeld op hogedruk gastransport is in de toekomst ook belangrijk indien waterstof dezelfde schaal zal krijgen als aardgas in Noordwest Europa. Een samenwerking met andere instituten en bedrijven zoals Euroloop en DNV Groningen ligt hier voor de hand en moet verder verkend worden.

B.9.2 Overzicht Volumetrie

Volgens de K999 scope d.d. 07-02-2024 (https://www.rva.nl/alle-geaccrediteerden/k999/) bestrijken de kalibratiefaciliteiten van het VSL het gasflowbereik (lucht) van (lage druk, max. 10 kPa) $2 \cdot 10^{-5}$ m^3/h (~0,33 ml/min) tot en met 15.000 m^3/h, met een onzekerheidsbereik van 0,09% - 0,4%, (hoge druk, max. 6 MPa) 5 m^3/h tot en met 230 m^3/h, met een onzekerheidsbereik van 0,06% - 0,29%, (aardgas, hoge druk, max. 6 MPa), 5 m^3/h tot en met 2.000 m^3/h, met een onzekerheidsbereik van 0,1% - 0,3%, en gassnelheid (lucht) van 0,1 – 35 m/s, met een onzekerheidsbereik van 1% tot 32%.

Volgens de K999 scope d.d. 07-02-2024 (https://www.rva.nl/alle-geaccrediteerden/k999/) bestrijken de kalibratiefaciliteiten van het VSL het vloeistofflowbereik (water) van 0,03 t/h (~0,5

kg/min) tot en met 2500 t/h, met een onzekerheidsbereik van 0,02% tot 0,04%, en van 0,03 m^3/h (~0,5 l/min) tot en met 2500 m^3/h, met een onzekerheidsbereik van 0,02% tot 0,04%.

De *Instromet Rotary Piston Prover* (IRPP's) vormen een belangrijke schakel in de herleidbaarheid naar internationale standaarden bij VSL. De IRPP's zijn echter *End of Life* (EOL) en ze worden niet meer gemaakt (fabrikant Instromet bestaat niet meer). Er zijn echter mogelijke alternatieven, zoals de T3RM *triple rotary meter*. Er moet budget worden gereserveerd voor het onderzoeken en aanschaffen van een alternatief voor de IRPP's.

B.9.3 Aanbevelingen Volumetrie

- Het huidige vloeistofflowbereik voor water moet worden uitgebreid naar het relevante bereik voor transport van vloeibaar stikstof, aardgas en waterstof.
- Het verdient aanbeveling om te onderzoeken of vloeibaar waterstof flow (-253 °C) representatief kan worden gemeten met vloeibaar stikstof (-181 °C) of lucht flow.
- Er moet onderzoek worden gedaan naar het vervangen van de IRPP's door adequate andere apparatuur, zoals b.v. de *triple rotary meters.*
- Het verdient aanbeveling om onderzoek te doen naar multiparameter systemen, bijvoorbeeld t.b.v. het meten van de waterkwaliteit, door middel van correlatie tussen de gemeten parameters en de kwaliteit van het water. Idem dito voor de samenstelling van aardgas, in- en uitgeademde lucht, e.d.
- Het verdient aanbeveling om onderzoeksprojecten voor de waterflowkalibratiefaciliteit op te zetten.
- In relatie tot de nieuwe energiedragers zoals waterstof (gas en cryogene vloeistof) en ammonia, methanol, LOHC en *e-fuels* kan aangesloten worden bij onderzoeksprogramma's die financiering vanuit EZK ontvangen, zoals groeifonds, Topsector energie of chemie en MOOI.
- Het verdient aanbeveling om de onzekerheid van de low-flow installatie LFI (een ijkbuis, piston prover) te reduceren naar 0,15% met geometrische afleiding van het volume van de ijkbuis.
- Het verdient aanbeveling een primaire standaard te ontwikkelen voor het meten van pure waterstofflow. Gezien de specifieke eisen die voor sommige waterstof toepassingen gelden qua zuiverheid zou de samenwerking met de groep chemie nog verder versterkt moeten worden. Denk aan gezamenlijke onderzoeksprogramma's of faciliteiten.

B.10 Data Science & Modelling (DSM)

B.10.1 Achtergrond DSM

De groep DSM is een nieuwe groep binnen VSL. De groep is groeiende, er zal de komende 5 jaar moeten worden uitgezocht of het een ondersteunende service zal blijven of een eigen metrologisch vakgebied kan worden, zoals IO, chemie, elektriciteit of volumetrie. Ook de categorie zal moeten worden vastgelegd: *key / fit for purpose / explore*: voor de aankomende 5 jaar wordt "*explore*" voorgesteld.

B.10.2 Overzicht DSM

De groep heeft al successen geboekt met wetenschappelijke publicaties en houdt zich onder andere bezig met de doorwerking van onzekerheden in complexe modellen, zoals gerealiseerd met *machine learning*, AI en andere wiskundige modellen. Er ontstaat vooral behoefte op gebieden waar complexe modellen gebruikt worden met een maatschappelijke en economische impact.

B.10.3 Aanbevelingen DSM

- De Raad adviseert om bij stakeholders zoals het planbureau voor de leefomgeving te onderzoeken welke mogelijkheden er liggen voor samenwerking. Wat kunnen we van elkaar leren qua modellenbouw en qua onzekerheidsevaluatie. Verder is nog niet duidelijk waar het RIVM-model voor stikstofoxide-depositie ondergebracht moet worden. De resultaten van dit model hebben verregaande consequenties voor bedrijven met een hoge stikstofoxide-depositie en ligt daarmee politiek uiterst gevoelig. Vooral het effect van onzekerheden in de invoervariabelen en modelparameters op de uiteindelijke uitkomst moet gedegen en onafhankelijk uitgevoerd worden, zodat het model boven alle twijfel verheven is. Uiteindelijk hoort het model te liggen bij een objectieve beheerder en het RIVM heeft aangegeven zich daar niet de juiste partij voor te vinden. VSL zou kunnen kijken of deze activiteit bij haar past en onder welke voorwaarden. Mogelijk naar analogie van het beheer en ontwikkeling van de nationale meetstandaarden.
- Naast dit model heeft RIVM andere modellen ontwikkeld, zoals die voor de verspreiding van virussen. Ook van deze modellen moet geanalyseerd worden hoe onzekerheden doorwerken en welke invloed deze hebben op het resultaat. Een samenwerking met het RIVM op het gebied van modelontwikkeling en de daarbij behorende onzekerheidsanalyse wordt dan ook aanbevolen.
- Op het themagebied van de energietransitie zal een goed model ontwikkeld en geëvalueerd moeten worden met betrekking tot het voorspellen van de belasting van het elektriciteitsnet, zodat fluctuaties tijdig en goedkoop opgevangen kunnen worden. Daarnaast kan objectieve informatie over de hoeveelheid beschikbare elektrische energie, bedrijven en consumenten helpen te beoordelen of de prijsstelling van die energie klopt.
- In de gezondheidszorg maar ook in andere themagebieden wordt veelvuldig gebruik gemaakt van AI-modellen, maar de kennis van de doorwerking van onzekerheden in zelfontwikkelde of commercieel verkrijgbare modellen is ver onder de maat. Het risico op hallucineren wordt onderkend maar er is nog veel behoefte aan structureel onderzoek hiernaar. Gezien de conclusies die getrokken (kunnen) worden op basis van deze modellen is onderzoek en onderwijs op dit vlak van grote noodzaak. Het is aan te bevelen voor één of meerdere AI-modellen grondig uit te zoeken hoe deze doorwerking werkt en daar mogelijk handvatten voor de industrie en ontwikkelaars uit te destilleren. Wellicht kan VSL dan op termijn de onzekerheidsanalyse helpen auditeren, zodat bedrijven zich kunnen accrediteren voor hun

modellen. VSL wordt aangemoedigd hier het voortouw in te nemen zodat hun expertise op dit gebied herkend wordt. Daarnaast zal met deze grotere bekendheid mogelijk marktvraag gegenereerd worden en zal DSM bekend worden bij EURAMET zodat er een goed startpositie wordt verworden als EURAMET meer projecten op DSM gaat opzetten.

- Een ander belangrijk onderwerp is *explainable* AI, dat wil zeggen AI die niet fungeert als een black box maar als een tool waarvan inzichtelijk is hoe de resultaten tot stand zijn gekomen. Zo kan beoordeeld worden of het model logisch is en een fysische basis heeft, indien relevant. Goed uitlegbare modellen zijn beter te toetsen op ongewenste bias en van dergelijke modellen kunnen de grenzen waarin ze verantwoord gebruikt kunnen worden beter vastgesteld worden. Op die manier kunnen AI-modellen verantwoord als snel alternatief ingezet worden voor complexe en rekenintensieve computermodellen (het weer; emissiemodellen). Uiteraard heeft de maker van het model deze verantwoordelijkheid maar de DSM-groep zou hiervoor hulp kunnen bieden in de vorm van richtlijnen die het liefst in Europees verband worden opgesteld. Een startpunt hiervoor kan zijn het modelleren van flow-systemen op basis van veel maar beperkt aantal meetinstrumenten. De vraag die dan opkomt is: moeten we tijd/energie steken in het verbeteren van het model of van het aantal of de locatie van meetpunten. Een vergelijkbare vraag speelt bij de bemonstering van stikstofoxide-uitstoot in stallen. Hoe is de onzekerheid zo efficiënt (en goedkoop) mogelijk omlaag te krijgen.
- Het wordt sterk aanbevolen om één of meer aansprekende problemen te adresseren die voor het publiek en de markt duidelijk maken waarom DSM binnen VSL nodig is. Het hoeft niet het belangrijkste probleem te zijn dat aangepakt moet worden maar wel een onderwerp dat mensen aanspreekt als het model fouten maakt. Voorbeelden zijn de maatschappelijke consequenties van foutieve voorspelling van de verspreiding van virussen of foutieve diagnoses door hallucinatie van een AI-model. Het gaat hierbij om de herleidbaarheid naar (inter)nationale standaarden met als uiteindelijk doelstelling dat Regressiemodellen en *Machine Learning* modellen moeten worden opgenomen in de *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*.
- VSL heeft de eigen ontwikkeling van software al goed gecentraliseerd en daarmee gestandaardiseerd. Dat moet behouden blijven of zelfs uitgebouwd. Daarnaast zou iets vergelijkbaars gedaan moeten worden voor de data die VSL genereert. Die moet FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable and Reusable*) zijn, binnen het instituut gestandaardiseerd worden en centraal worden opgeslagen. Op een dergelijke manier zou de DSM-groep daar wellicht onderzoek op de eigen data van VSL kunnen doen. Als deze opslag voldoet aan alle regelgeving zou externe data (anonieme medische beelden, gegevens van veldmetingen etc.) opgeslagen kunnen worden die als invoer- of testdata gebruikt kan worden voor nieuwe AI-modellen. Dit zouden datasets kunnen zijn om AI-modellen te valideren binnen bepaalde grenzen.
- De vraag naar validatie en certificatie van metrologische software is aanwezig en zal in de toekomst zeker toenemen. Hier liggen voor het VSL mogelijkheden ten opzichte van minder klantgerichte instituten zoals bijvoorbeeld de PTB.

Lijst met afkortingen

AI	Artificial Intelligence
Ag	Zilver
Al	Aluminium
Ar	Argon
BIPM	Internationaal Bureau voor Maten en Gewichten
BTEX	Aromatische en cyclische koolwaterstoffen
CAO	Collectieve arbeidsovereenkomst
CCEM	Adviescommissie voor elektriciteit en magnetisme
CIPM MRA	Mutual Recognition Arrangement
CGM's	Calibrated Gas Mixtures
CMM	Coördinaten MeetMachine
CRM's	Certified Reference Materials
C	Celsius
Cs	Cesium
CT	Computer Tomografie
Cu	Koper
DC	Gelijkspanning
DSM	Data Science & Modeling
EMN	European Metrology Networks
EMPIR	European Metrology Programme for Innovation and Research
EPM	European Partnership on Metrology
ESTRO	European Society for Radiotherapy and Oncology
EZK	Ministerie van Economische Zaken en Klimaat
FAIR	Findable, Accessible, Interoperable and Reusable
FHI	federatie van technologiebranches
FME	Federatie Metaal-en Elektrotechnische Industrie
Ga	Gallium
Hg	Kwik
HNO_3	Salpeterzuur
HSC	Health and Safety Code
HeNe	Helium Neon
IMRT	Intensity Modulated RadioTherapy
In	Indium
IO	Ioniserende straling
IRPP	Instromet Rotary Piston Prover
KU Leuven	Katholieke Universiteit Leuven
kPa	KiloPascal
LED	Light Emitting Diode
LNG	Liquefied natural gas/aardgas
LOHC	Liquid organic hydrogen carriers
MASER	Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation
MKB	Midden-en Kleinbedrijf
m^3/h	De hoeveelheid lucht die verplaatst wordt binnen een bepaalde tijdseenheid
µm	Micrometer
mg	Milligram
min	Minuut
mK	Milli Kelvin
ml	Milliliter
mm	Millimeter
MPa	MegaPascal
m/s	Meter per seconde
mSv	Millisievert
NEN	Nederlands Normalisatie Instituut
NIST	National Institute of Standards and Technology
NKI	Nederlands Kanker Instituut
nm	Nanometer

NMI	Nationaal Metrologisch Instituut
NO	Stikstofmonooxide
NO_2	Stikstofdioxide
ONL	Ondernemend Nederland
Pa	Pascal
PET	Positron Emissie Tomografie
PFAS	Per- en polyfluoralkylstoffen
PRM’s	Primary Reference Materials
RH	Relatieve vochtigheid
RvA	Raad voor Accreditatie
RVO	Rijksdienst voor Ondernemend Nederland
RoCoF/FRT	Rate of Change of Frequency / fault ride through
Sn	Tin
SPECT	Single photon emissie computer tomografie
sVOC	Semi-Volatile Organic Compound
t/h	ton/uur
TNO	Nederlandse organisatie voor Toegepast-Natuurwetenschappelijk Onderzoek
TPW	Tripel Punt Water
TU Delft	Technische Universiteit Delft
TU/e	Technische Universiteit Eindhoven
UMC	Universitair Medisch Centrum
UT	Universiteit Tilburg
UTC	Coordinated Universal Time
VMAT	Volumetric Modulated Arc Therapy
VNO-NCW	Verbond van Nederlandse Ondernemingen - Nederlands Christelijk Werkgeversverbond
VOC	Vluchtige Organische Componenten
VWS	Ministerie van Volksgezondheid, Welzijn en Sport
XCT	X-ray Computed Tomography
Zn	Zink