

Die Referenz.

Das Schweizer Metrologiemagazin

Nr. 01 | 2023

[Seite 22 →](#)

Zertifizierte Referenzmaterialien: Metrologie im Dienst der Lebensmittelsicherheit

[Seite 4 →](#)

Messsysteme
für nanoskalige
elektrische Teile

[Seite 18 →](#)

10 Jahre als
eidgenössisches
Institut



Editorial

Liebe Leserin, lieber Leser

Jetzt ist sie da: «Die Referenz.», das Schweizer Metrologiemagazin. Es ist die erste Ausgabe der neu gestalteten Fachzeitschrift für Metrologie des METAS (ehemals METInfo). Sie hat einen neuen Namen und präsentiert sich in einem neuen Kleid. Bei allen Neuerungen bleibt die Zielsetzung aber die gleiche: Informationen über Entwicklungen auf dem weiten Gebiet der Metrologie zu vermitteln, von der wissenschaftlichen (Ergebnisse von Forschung und Entwicklung) über die industrielle (Dienstleistungsangebote und Kurse) bis zur gesetzlichen Metrologie.

Ob Sie die gedruckte Zeitschrift in den Händen halten oder das PDF am Bildschirm vor sich haben – ich lade Sie ein, in der Zeitschrift «Die Referenz.» zu blättern

Impressum

Herausgeber

Eidgenössisches Institut für Metrologie METAS
Lindenweg 50, 3003 Bern-Wabern, Schweiz
Tel. +41 58 387 01 11
metas.ch

Redaktionsleitung

Xavier Rappo
kommunikation@metas.ch

Redaktionsteam

Fabiano Assi
Hugo Lehmann
Jürg Niederhauser
Ulrich Schneider

Sprachversionen

DE, FR, EN (online)

Bildnachweis

METAS, Shutterstock (S. 22); Nadja Stadelmann (S. 23)
AEROMET-II-Konsortium (S. 32–35)

Gestaltung

Casalini Werbeagentur AG
casalini.ch

Copyright

© 2023
Eidgenössisches Institut für Metrologie METAS, Bern
Der Nachdruck von Artikeln ist mit Quellenangabe gestattet. Bitte schicken Sie ein Belegexemplar an die Redaktionsadresse.

Auflage

2500 Exemplare deutsch
1500 Exemplare französisch
Englisch online

Druck

Courvoisier-Gassmann AG, Biel
courvoisier.ch

Administration

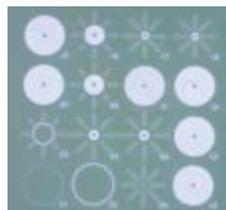
ISSN 1660-4733
ISSN 1660-6094 (Online-Edition)
24/04 3800 860376853/2

Titelseite:

Mitarbeitende des METAS im Analytiklabor.

Inhalt

4 Nano- elektrische Metrologie für die Industrie



8 Das weltweite Referenz- labor für halogenierte VOCs



12 In Kürze



und sich über Neuerungen und Entwicklungen im METAS und in der Metrologie-Welt zu informieren. So werfen wir in dieser Ausgabe zum Beispiel einen Blick zurück, als das METAS vor gut zehn Jahren von einem Bundesamt in ein eidgenössisches Institut überführt wurde (Seite 18).

Der Klimawandel stellt auch die Metrologie vor neue Herausforderungen. Sowohl Wissenschaft als auch Politik und Verwaltung sind auf zuverlässige und vergleichbare Daten angewiesen. Das gilt unter anderem für das Vorkommen und die Verteilung klimaschädlicher Gase, wie zum Beispiel halogenierte flüchtige organische Substanzen. Für solche Substanzen hat das METAS rückführbare Referenzgase entwickelt.

Vor Kurzem ist das Labor Gasanalytik des METAS als weltweites Referenzlabor für die Kalibrierung dieser Gase von der *World Meteorological Organization (WMO)* anerkannt worden (Seite 8).

Das sind zwei Beispiele aus dem vielfältigen Inhalt dieser Ausgabe. Ich hoffe, dass Ihnen «Die Referenz.» sowohl von der äusseren Erscheinung als auch inhaltlich gefällt. Ich freue mich auf Ihre Rückmeldung.

Dr. Philippe Richard
Direktor
Eidgenössisches Institut für Metrologie METAS

14 Interview mit dem neuen Leiter der Abteilung Physik

«Der grösste Unterschied liegt in der Dimension und der Komplexität der Verantwortlichkeiten.»

18 Zehn Jahre als eidgenössisches Institut



21 Objekt



22 Zertifizierte Referenzmaterialien: Metrologie im Dienst der Lebensmittelsicherheit

28 Ein Bier in einer Minute oder in dreissig Jahren zapfen dank flexibler präziser Durchflüsse

32 Fortschrittliche Aerosol-Metrologie für Atmosphärenwissenschaft und Luftqualität



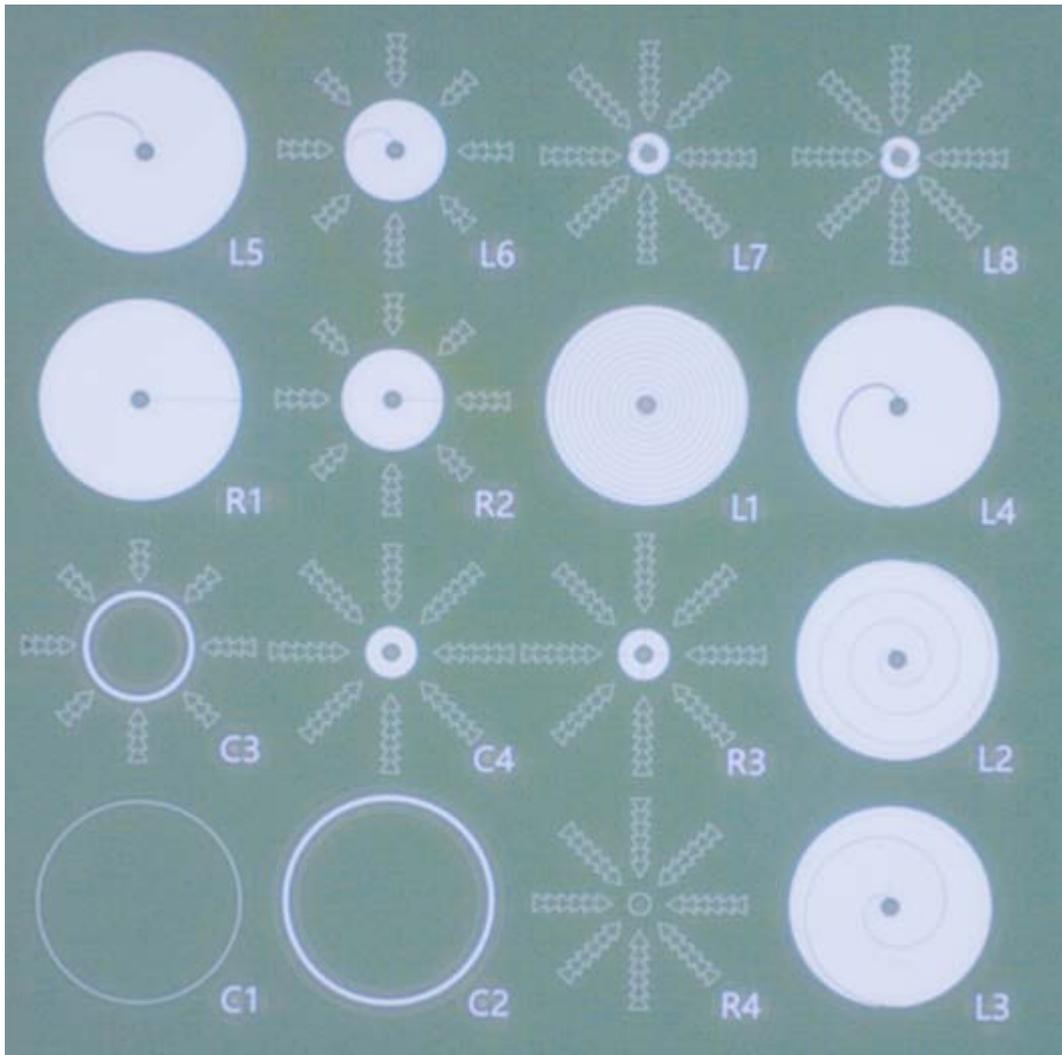


Abbildung 1: Standards für koaxiale SMM-Spitzen auf einer Siliziumoxid-Membran (weiss), welche grösstenteils mit Gold (grün) beschichtet ist. Die Bezeichnungen L, R, C stehen für Induktivitäten, Widerstände und Kapazitäten.

Forschung und Entwicklung

Nanoelektrische Metrologie für die Industrie

Von der Waschmaschine bis zum Quantencomputer – nahezu alle elektronischen Geräte enthalten heutzutage Schaltungen, die auf Halbleitern basieren. Diese integrierten Schaltungen enthalten wiederum kleinste, nanoskalige elektrische Bauteile. Um solche Bauteile oder allgemeiner ausgedrückt Materialien örtlich aufgelöst zu messen, braucht man Messsysteme mit einer sehr feinen Prüfspitze.

Dr. Johannes Hoffmann, Sophie de Préville, Bruno Eckmann, Dr. Hung-Ju Lin, Dr. Markus Zeier

Das Projekt ELENA (ELEctrical NANoscale metrology in industry) hat zum Ziel, nanoskalige elektrische Messungen einfacher und zuverlässiger zu machen. Angestrebt werden zum einen die Rückführbarkeit der Resultate auf SI-Einheiten (Zuverlässigkeit) und zum anderen der Einsatz in der Industrie (Einfachheit). Dabei werden zwei unterschiedliche Vertreter aus der Rastersondenmikroskopie eingesetzt: Zum einen das «Conductive Atomic Force Microscope» (C-AFM), das zusätzlich zur Topologie elektrische Größen bei Gleichstrom oder im Niederfrequenzbereich misst; zum anderen das «Scanning Microwave Microscope» (SMM), das mit Hochfrequenzsignalen im Gigahertz-Bereich arbeitet. Die Arbeiten am METAS konzentrieren sich auf das SMM und gliedern sich in folgende Hauptpunkte: Entwurf von zwei neuen Referenzsubstraten für die Kalibrierung mit koaxialen Prüfspitzen, Entwurf einer kostengünstigen Elektronik für SMM-Messungen und Aufbau eines Messplatzes für Kundenmessungen.

Das Scanning Microwave Microscope mit koaxial abgeschirmter Spitze

Ein SMM besteht im Wesentlichen aus einem Rastersondenmikroskop (AFM) mit leitfähiger Prüfspitze. Diese ist mit einer Elektronik gekoppelt, die Hochfrequenzsignale zur Spitze schickt und die von dort reflektierten Signale wieder empfängt. Gemessen wird der Reflexionskoeffizient, d.h. das Verhältnis zwischen reflektiertem und gesendetem Signal. Da Reflexionsamplitude und Winkel von den Materialeigenschaften des Substrats unter der Spitze abhängen, können daraus rechnerisch Größen wie Leitfähigkeit, Permittivität, Widerstand, Induktivität, Kapazität oder Dotierungsdichte ermittelt werden. Ausserdem lässt sich durch Überlagerung eines niederfrequenten Signals die Dotierungsart von Halbleitern bestimmen. Für die Einspeisung des niederfrequenten Signals muss der Hochfrequenzaufbau des SMM allerdings leicht modifiziert werden.

Die kommerziell erhältlichen SMM-Systeme enthalten alle Spitzen, die elektrisch nur teilweise abgeschirmt sind. Dies hat zur Folge, dass sich in der Umgebung des eigentlichen Messpunktes vorhandene Strukturen im Messergebnis störend bemerk-

bar machen. Grund dafür ist die elektrodynamische Kopplung zwischen diesen Strukturen und der freiliegenden Spitze. Sind Geometrien und Materialeigenschaften bekannt, kann diese Kopplung weggerechnet werden. Falls jedoch das Messobjekt gewechselt werden muss, z.B. der Wechsel von einem Referenzsubstrat zum eigentlichen Prüfling, lässt sich dieser Einfluss nicht mehr rechnerisch beheben. Ein solcher Wechsel ändert die gemessenen Signale des SMM so stark, dass eine Kalibrierung des Geräts nur möglich ist, wenn die Kalibrierstandards auf dem gleichen Substrat wie das Messobjekt untergebracht sind. Um diese Probleme zu beheben, hat das METAS bereits in der Vergangenheit eine koaxial abgeschirmte Spitze entwickelt.¹

Zwei neue Referenzsubstrate

Die existierenden Referenzsubstrate für SMM, wie z.B. die in [2] beschriebenen Referenzsubstrate, sind jedoch in erster Linie für nicht-koaxiale Spitzen geeignet. Die Kontaktfläche einer koaxial abgeschirmten

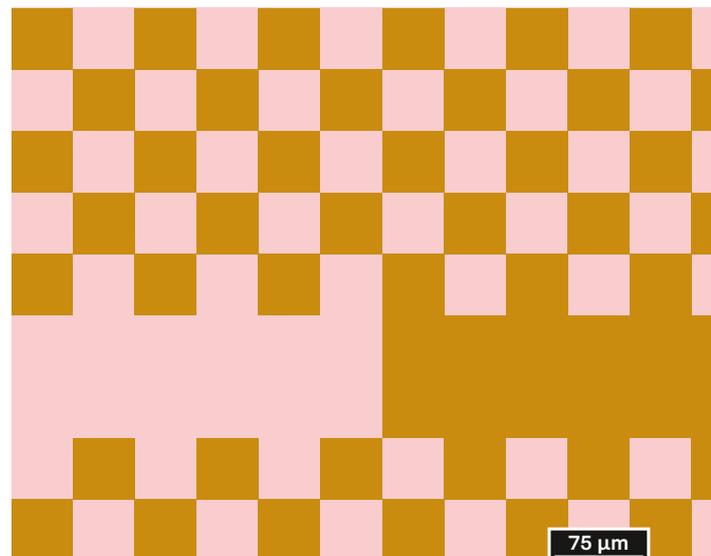


Abbildung 2: Schachbrettmuster von ITO (rosa) auf Siliziumdioxid (braun). Diese Struktur liegt in unterschiedlichen Dicken vor und wird als Referenzsubstrat für die Kalibrierung von koaxialen Spitzen des SMM benutzt. Die Farben des ITO und des Siliziumdioxids in diesem Bild entstehen durch Interferenz und Hintergrundmaterial. ITO und Siliziumdioxid sind transparent.



Abbildung 3: Elektronik für SMM-Messungen. Die Elektronik besteht aus einem «Software-Defined Radio», einem «Single Board Computer», einem Niederfrequenz-Signalgenerator und einem Hochfrequenznetzwerk, welches die Nutzsignale des SMM von den Hintergrundsignalen separiert. An den Stecker der Frontplatte wird mit einem Koaxialkabel die Messspitze des Rasterkraftmikroskops angeschlossen.

Messspitze ist aufgrund ihres Aufbaus grösser als die Kontaktfläche einer ungeschirmten Spitze. Dies kann während der Messung zu einem Kurzschluss führen. Um dies zu vermeiden, entwarf das METAS zwei neue Kalibriertsubstrate für koaxiale Spitzen. Das erste Substrat ist eine Modifikation eines schon aus dem ADVENT-Projekt bekannten Substrats.¹ Es besteht aus einem Siliziumwafer, auf dessen Oberfläche freistehende Siliziumoxid-Membranen angebracht sind. Auf den Membranen ist eine Goldschicht mit unterschiedlich eingetätzten Mustern aufgebracht (siehe Abbildung 1). Über die Geometrie dieser Muster werden unterschiedliche Impedanzen erzeugt: Kondensatoren (Kreisfläche mit Isolationsring zur äusseren Massefläche), Widerstände (Mittelpunkt mit Brücken zur äusseren Massefläche) und Induktivitäten (Mittelpunkt mit Spirale zur äusseren Massefläche). Diese Standards sind für grössere koaxiale Spitzen (Aussendurchmesser ca. 20 μm) geeignet.

Eine zweite Art von Referenzsubstraten für koaxiale Spitzen basiert auf Strukturen mit «Indium Tin Oxide» (ITO). Dies ist ein relativ schwach leitendes transparentes Oxid, welches auch in den meisten Touchscreens (z.B. im Mobiltelefon) als Elektrode eingesetzt wird. Die Standards bestehen aus einem Schachbrettmuster unterschiedlich dicker Schichten ITO, die auf mit Siliziumoxid beschichteten Siliziumwafern aufgebracht sind (siehe Abbildung 2). So kann eine beliebig feine koaxiale Spitze kalibriert werden.

Die beiden neu entwickelten Referenzsubstrate haben unterschiedliche Merkmale: Die membranbasierten Standards bieten bestmögliche Kalibrierengenauigkeit für alle möglichen Messobjekte, sind aber auf grosse koaxiale Spitzen beschränkt. Die ITO-basierten Standards bieten gute Kalibriermöglichkeiten für widerstandsähnliche Messobjekte, haben aber



erhöhte Messunsicherheiten für kapazitive oder induktive Messobjekte. Dafür eignen sich die ITO-Standards für beliebige feine koaxiale Spitzen.

Entwicklung einer kostengünstigeren Messelektronik für die Industrie

Als Messelektronik für SMM-Messungen wird normalerweise ein Vektornetzwerkanalysator (VNA) eingesetzt. Dies stellt jedoch einen beträchtlichen Kostenfaktor dar, was zu einem sehr zurückhaltenden Einsatz der SMM-Messtechnik in der Industrie geführt hat. Gemeinsam mit einem Industriepartner hat das METAS eine Messelektronik entworfen, welche spezifisch auf die Anforderungen des SMM ausgerichtet und wesentlich kostengünstiger ist als ein VNA. Dadurch kann der Zugang zur Messtechnik vereinfacht werden. Die Elektronik basiert auf einem «Software-Defined Radio» (SDR), welches, vereinfacht dargestellt, ein generisches Hochfrequenz-

Sende- und Empfangsmodul mit unmittelbarer und sehr breitbandiger Digitalisierung des analogen Signals ist. Bei diesem Ansatz geht es vor allem um die digitale Signalverarbeitung. Entsprechend fällt ein wesentlicher Teil des Aufwandes bei der Programmierung der Elektronik an. Dazu müssen zwei Systeme programmiert werden: einerseits der programmierbare Logikbaustein, welcher die Filter enthält und die Ansteuerung des Hochfrequenzteils der Schaltung übernimmt; andererseits die Schnittstelle zwischen dem PC und dem Messinstrument. Ausserdem entwickelte das METAS ein Hochfrequenznetzwerk zur Signalführung und -trennung. Die Signale werden damit möglichst verlustfrei bis zur Messspitze des Instruments geleitet, und die reflektierten Signale werden von Hintergrundeinflüssen isoliert. Dies ist nötig, da die Nutzsignale sehr klein sind und einer hohen Verstärkung bedürfen. Wenn die Nutzsignale nicht gut vom Hintergrundsignal getrennt sind, lässt sich das resultierende Signal schlecht verstärken, und es wird schwierig, aus den Messdaten Schlüsse zu ziehen.

Zum Aufbau einer Messdienstleistung mit dem SMM werden nun in einem nächsten Schritt im Rahmen des Projekts ELENA die notwendigen Anweisungen, Messroutinen, Unsicherheitsbudgets und Qualitätsdokumente gemäss ISO 17025 erarbeitet. Anschliessend wird eine Vergleichsmessung zwischen dem Nationalen Metrologieinstitut Frankreichs («*Laboratoire national de métrologie et d'essais*», LNE) und dem METAS gemacht, um die erarbeiteten Unsicherheitsbudgets und Messroutinen praktisch zu testen und die Vergleichbarkeit sicherzustellen. Sind allfällige Unstimmigkeiten behoben, kann die neue Messdienstleistung in die «Key Comparison Database» (KCDB)³ des «*Bureau International des Poids et Mesures*» (BIPM) eingetragen werden. Damit erhalten Kalibrierzertifikate mit SMM-Resultaten internationale Anerkennung. ●

Dieses Projekt wird durch den EMPIR Grant «20IND12 Elena» der EU gefördert.

- ¹ Hoffmann et al, METInfo Vol. 28, No. 1/2021
- ² LeQuang et al, Rev. Sci. Instrum. 92, 023705 (2021)
- ³ KCDB: Key Comparison Database, bipm.org/kcdb

Referenzmaterial

METAS – das weltweite Referenzlabor für halogenierte VOCs

Das Gasanalytiklabor des METAS ist seit diesem Sommer das erste weltweite Referenzlabor für zehn halogenierte, flüchtige organische Verbindungen in der Atmosphäre. Damit trägt das METAS zu langfristig stabilen und vergleichbaren Klimadaten bei.

Dr. Tobias Bühlmann, Céline Pascale

In der Atmosphäre findet man weit über 30 verschiedene halogenierte, flüchtige organische Verbindungen, sogenannte halogenierte VOCs. Diese Substanzen haben kaum aussprechbare Namen, wie zum Beispiel HFO-1336mzzZ, HFC-365mfc oder 1,2-Dichloroethan. Sie stammen aus Kälteanlagen, Kühlschränken, Treibgasen für Spraydosen oder wurden als Lösungsmittel eingesetzt. Über Lecks oder unsachgemäße Handhabung gelangen sie in die Atmosphäre. Zu den halogenierten VOCs gehören unter anderem die Fluorchlorkohlenwasserstoffe, die sogenannten FCKWs, welche das Ozonloch verursachten und deshalb im Rahmen des Montreal-Protokolls verboten wurden. Die FCKWs wurden danach durch teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe und chlorfreie Alternativen ersetzt, die sich aber als starke Treibhausgase entpuppten und deshalb ebenfalls im Montreal- und im Kyoto-Protokoll reguliert wurden. Die halogenierten VOCs tragen signifikant zur Klimaerwärmung bei. So verursachten sie im Jahr 2019 rund 15 Prozent des gesamten anthropogenen





Strahlungsantriebs. Die neueste Generation von halogenierten VOCs, die sogenannten Hydrofluorolefine (HFOs), sind keine starken Treibhausgase. Es wird aber angenommen, dass deren Abbauprodukte schädliche Auswirkungen auf die Umwelt haben. Dies unterstreicht die Wichtigkeit, sämtliche in der Atmosphäre vorhandenen halogenierten VOCs weltweit, vergleichbar und genau messen zu können.

Vergleichbare und genaue Messungen von halogenierten VOCs

Nur mit vergleichbaren und genauen Messungen kann überprüft werden, ob die getroffenen Massnahmen zur Minderung der Emissionen auch Wirkung zeigen. Doch solche Messungen sind nicht einfach, da diese Substanzen in der Atmosphäre in sehr tiefen Anteilen vorkommen. Zum Beispiel kommt das Kältemittel HFO-1336mzzZ auf eine Billion Teilchen in der Atmosphäre weniger als einmal vor. Es ist deshalb nicht verwunderlich, dass nur hochspezialisierte Institutionen solche Messungen überhaupt durchführen können. Zu diesen Institutionen gehören die «Global Atmosphere Watch»-Messstationen (GAW) von der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) oder die beiden Netzwerke «Advanced Global Atmospheric Gases Experiment» (AGAGE) und «National Oceanic and Atmospheric Administration» (NOAA).

Doch es reicht nicht, einfach zu messen, denn die Messgeräte müssen mit hochpräzisen, SI-rückführbaren Referenzgasen kalibriert werden. Und genau da, wenn es um SI-rückführbare Referenzgase geht, kommt das METAS ins Spiel. SI-rückführbar bedeutet, dass ein Messwert durch eine ununterbrochene Kette von Kalibrierungen auf einen anerkannten Standard – in diesem Falle auf das Internationale Einheitensystem SI – bezogen ist. Dadurch werden Messungen unabhängig von Ort und Messmethode über lange Zeit vergleichbar, was insbesondere der Wissenschaft sowie Entscheidungsträgern aus der Politik und Verwaltung dient.



Aufkonzentrierereinheit
des Messgeräts für
halogenierte VOCs.

SI-rückführbare Referenzgasgemische für halogenierte VOCs

Die Europäische Vereinigung nationaler Metrologieinstitute (EURAMET) hatte in ihrer Roadmap vor zehn Jahren festgehalten, dass ihre Mitglieder eine Nische im Bereich ihrer Expertise besetzen und pflegen sollten, um die Qualität möglichst hochzuhalten und unnötige Mehrspurigkeiten zu verhindern. Das Gasanalytiklabor am METAS hatte schon damals langjährige Erfahrung mit der dynamischen Herstellung von Referenzgasen im Bereich Luftschadstoffe. Zu dieser Zeit meldete die Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), welche Messstationen für halogenierte VOCs in der Atmosphäre betreibt, Bedarf für neue Referenzgase an. Denn für gewisse halogenierte VOCs gab es keine Referenzen, für wiederum andere gab es nicht SI-rückführbare Referenzen, welche zum Teil nicht miteinander übereinstimmten. Der Bedarf für SI-rückführbare Referenzgasgemische für halogenierte VOCs war also vorhanden und stellte die perfekte Nische für das METAS dar. Umso mehr, als dass die nötige Expertise vorhanden war und kein anderes nationales Metrologieinstitut in diesem Bereich arbeitete. Das Gasanalytiklabor hat deshalb im Jahr 2014 im Rahmen eines internen Projekts begonnen, die vorhandene Infrastruktur zu erweitern, um Referenzgasgemische für halogenierte VOCs herstellen zu können. Da diese Substanzen in sehr tiefen Anteilen in der Atmosphäre vorkommen und in ähnlichen Anteilen im Referenzgasgemisch vorliegen müssen, benötigt die Herstellung solcher Referenzgasgemische ein spezielles Instrumentarium.

Dynamischer Herstellungsprozess

Der Herstellungsprozess für SI-rückführbare Referenzgase beginnt mit einem sogenannten Permeator. Dies ist ein kleines Röhrchen mit einer Membran, welches mit einem reinen halogenierten VOC gefüllt ist. Soll zum Beispiel ein Referenzgas für HFO-1336mzzZ hergestellt werden, dann ist dieses Röhrchen mit ebendieser Substanz gefüllt. Bei konstanter Temperatur und konstantem Druck tritt immer die gleiche Menge des reinen halogenierten VOC – in diesem Fall HFO-1336mzzZ – aus dem Permeator aus. Mittels einer sogenannten Magnetschwebewaage wird gemessen, wie viel von dieser Substanz pro Zeit aus dem Röhrchen austritt. Denn wenn die Substanz aus dem Röhrchen austritt, wird dieses leichter. Da dieser Masseverlust aber bloss 100 bis 500 Nanogramm pro Minute beträgt, dauern solche Messungen mehrere Tage, bis schliesslich ein stabiler und aussagekräftiger Messwert des Massenverlusts vorliegt. Während der Messung hängt der Permeator in einer Permeationskammer, durch die eine definierte Menge Gas geleitet wird. Aus dem Massenverlust des Permeators und diesem Gasstrom errechnet sich der Anteil des halogenierten VOC im Referenzgas. Dieser Anteil ist noch deutlich über demjenigen in der Atmosphäre, weshalb das Referenzgas über zwei Stufen weiter verdünnt werden muss.

Kleinste Verunreinigungen müssen identifiziert werden

Verunreinigungen des Referenzgases und Verluste müssen zwingend verhindert werden, denn der kleinste Verlust oder die kleinste Verunreinigung machen ein Referenzgasgemisch unbrauchbar. Deshalb ist das Instrumentarium des METAS mit einer speziellen Beschichtung ausgestattet, welche verhindert, dass Teilchen des Referenzgases an den Oberflächen der Instrumente kleben bleiben und so verloren gehen. Zudem wurde die ganze Einrichtung auf potenzielle Verunreinigungen untersucht. Für solche Messungen wird ein spezielles Messgerät benötigt, damit kleinste Spuren dieser Substanzen überhaupt gemessen werden können. Die Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA) hat für das METAS ein Gerät gebaut, welches die zu messenden Substanzen aus bis zu sechs Litern Luft aufkonzentriert und dann mit einem Gaschromatographen und einem Massenspektrometer misst. Dank diesem Gerät können nun auch kleinste Verunreinigungen festgestellt werden.

Abfüllprozess bei -196 °C

Um das dynamisch hergestellte SI-rückführbare Referenzgasgemisch aufzubewahren und zu transportieren, wird es in Edelstahlzylinder abgefüllt. Doch das ist nicht einfach, da bei der Produktionsanlage zwischen zwei und fünf Liter Gas pro Minute drucklos herausströmen. Damit das Abfüllen trotzdem gelingt, wurde am METAS speziell für diese Anwendung ein «Cryo-Filling-System» entwickelt und stetig verbessert. Das «Cryo-Filling-System» funktioniert nach dem Prinzip der «Kühlfalle»: Der zu füllende Zylinder wird in ein mit Flüssigstickstoff gefülltes Gefäss gestellt. Flüssigstickstoff ist mit -196 °C extrem kalt und verflüssigt das Gas, das in den kalten Zylinder fliesst. Dank dem «Cryo-Filling-System» lässt sich sehr genau steuern, wie viel Gas in den Zylinder gefüllt wird. Nach dem Befüllen muss der Zylinder aufgetaut werden. Anschliessend wird die Qualität des SI-rückführbaren Referenzgases geprüft, welches danach bereit für die Kalibrierung von Messgeräten ist.

Referenzgasgemische

Das METAS entwickelte im Rahmen des Projekts «HIGHGAS: Metrology for High Impact GreenHouse GASes», welches anlässlich des «European Metrology Research Programme» ab dem Jahr 2014 durchgeführt wurde, ein Set von SI-rückführbaren Referenzgasgemischen für fünf halogenierte Substanzen. Aus diesem Set werden nun die beiden halogenierten VOCs HFO-1234yf und CFC-13 vom AGAGE-Netzwerk für ihre Kalibrierungen verwendet. Dies bedeutete für das METAS einen grossen Erfolg und brachte viel internationale Anerkennung. Ein weiteres Set von

SI-rückführbaren Referenzgasgemischen für sechs Substanzen wurde in einem METAS-internen Folgeprojekt sowie im Rahmen des Projekts «MetClim-VOC: Metrology for climate relevant volatile organic compounds» erarbeitet. Letzteres wurde anlässlich des «European Metrology Programme for Innovation and Research» durchgeführt. Dank diesem neuen Referenzgasset konnte die EMPA als erstes und bisher einziges Institut HFO-1336mzzZ in der Atmosphäre quantifizieren. Zudem verwendet AGAGE dieses Referenzgasgemisch, um 1,2-Dichlorethan in der Atmosphäre weltweit vergleichbar zu messen – ein weiterer Erfolg für das METAS.

Das METAS als «Central Calibration Laboratory»

Das Programm «Global Atmospheric Watch» (GAW) der «World Meteorological Organization» (WMO) ist eine Partnerschaft von über 100 Ländern, welche das Ziel verfolgen, die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre mit einem weltweiten Netzwerk von Messstationen langfristig und vergleichbar zu überwachen. Damit dies funktioniert, braucht es qualitativ hochwertige Referenzen. Für bestimmte Substanzen übernimmt jeweils eine spezialisierte Institution die Aufgabe als «Central Calibration Laboratory» innerhalb des GAW. Dies bedeutet, dass diese Institution diese Referenzen herstellt und den GAW-Messstationen verfügbar macht. Für Stickoxide hat diese Aufgabe zum Beispiel das holländische Metrologieinstitut übernommen und für Ozon das amerikanische Pendant. Für halogenierte VOCs gab es bisher kein «Central Calibration Laboratory». Es lag für das Gasanalytiklabor des METAS nach bald einem Jahrzehnt Erfahrung in diesem Bereich deshalb auf der Hand, sich beim GAW-Programm für diese Funktion zu bewerben – und zwar mit Erfolg. Seit Juni 2023 hat das METAS die Funktion als «Central Calibration Laboratory» für insgesamt zehn halogenierte VOCs inne. Finanziert wird dies durch MeteoSchweiz, welches die Aufgaben des GAW in der Schweiz koordiniert. Mit dieser wichtigen Aufgabe legte das METAS den Grundstein, dass innerhalb des GAW-Netzwerkes in Zukunft diese Substanzen weltweit vergleichbar gemessen werden können. Das Gasanalytiklabor kann sich aber nicht auf den Lorbeeren ausruhen, denn es gibt noch zahlreiche halogenierte VOCs in der Atmosphäre, für die es noch keine SI-rückführbaren Referenzen gibt – es bleibt also noch viel zu tun. ●



Die farbig schimmernde Beschichtung verhindert, dass Teilchen des Referenzgases an Oberflächen kleben bleiben.



Verstärkung der Beziehungen mit dem nationalen Metrologieinstitut von Japan

Das METAS als nationales Metrologieinstitut der Schweiz und das japanische nationale Metrologieinstitut haben am 22. Juni 2023 in Paris am Rande einer Sitzung des *Comité International des Poids et Mesures (CIPM)* eine **Vereinbarung zur Verstärkung der gegenseitigen Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Metrologie und der Referenzmasse abgeschlossen**. Unterzeichnet wurde das *Memorandum of Understanding* vom Direktor des METAS, Dr. Philippe Richard, und dem Generaldirektor des *National Metrology Institute of Japan (NMIJ)*, Dr. Takashi Usuda. Ziel dieser Vereinbarung ist es, den Austausch von wissenschaftlichen und technischen Kenntnissen zwischen dem METAS und dem NMIJ zu fördern und die wissenschaftlichen und technischen Kompetenzen der beiden nationalen Metrologieinstitute zu erweitern.

Unser Metrologiemagazin mit neuem Titel und im neuen Kleid



Nach über 15 Jahren im gleichen Look war es an der Zeit, das «**METinfo**» einer Verjüngungskur zu unterziehen. Gesagt, getan: Aus «**METinfo**» wurde «**Die Referenz.**», und das bisherige Layout wurde komplett überarbeitet und auf den neuesten Stand gebracht. Das Magazin ist neu strukturiert und hat an Lesbarkeit gewonnen. Um Ihnen eine bessere Orientierung zu ermöglichen und interessante Einblicke zu bieten, haben wir ausserdem neue Rubriken geschaffen: So sind unter anderem die Rubriken «In Kürze», «Objekt» und «Blick hinter die Kulissen» entstanden – die ersten beiden können Sie in dieser Ausgabe kennenlernen. Wie das bisherige Metrologiemagazin wird auch «Die Referenz.» informative Inhalte und eine breite Themenvielfalt bieten. Eine digitale Version in der Form eines PDFs kann jederzeit auf unserer Website heruntergeladen werden.

SPG-Preis Metrologie

Der diesjährige METAS-Preis für eine herausragende Arbeit mit Bezug zur Metrologie wurde Anfang September 2023 an Dr. Mohammad J. Beryhi verliehen. Ausgezeichnet wurde er für seine an der EPF Lausanne verfasste Doktorarbeit zu nanomechanischen Quantensystemen. Seit 2014 stiftet das METAS einen Preis der Schweizerischen Physikalischen Gesellschaft (SPG). Die diesjährige Preisverleihung fand im Rahmen der Jahrestagung der SPG in Basel statt. Wir gratulieren Mohammad J. Beryhi herzlich zu dieser Auszeichnung und wünschen ihm viel Erfolg als CEO seines Start-ups Luxtelligence.

Bob Joseph Mathew ist Präsident des CIML

Seit dem 17. Oktober 2023 ist Dr. Bob Joseph Mathew der Präsident des *Comité International de Métrologie Légale (CIML)*.

Er wurde für eine sechsjährige Amtszeit gewählt. Der Abteilungsleiter Gesetzliche Metrologie und stellvertretende Direktor des METAS ist der erste Schweizer, der dieses Amt bekleidet. Vorher war er vier Jahre lang Vizepräsident dieses Komitees.

Er ist der zehnte Präsident der seit 1955 bestehenden internationalen Organisation.





Ein vertrauenswürdiges Qualitätssystem

Das Vertrauen in das Funktionieren des Qualitätssystems wurde am 29. März 2023 anlässlich des *Annual Meeting des Technical Committee for Quality (TC-Q)*, das dieses Jahr vom METAS im eigenen Haus organisiert wurde, um weitere fünf Jahre verlängert.

METAS betreibt seit 2001 ein Qualitätsmanagementsystem, das seine metrologischen Tätigkeitsbereiche nach den Normen ISO 17025 und ISO 17034 abdeckt. Das Qualitätsmanagementsystem wird durch das *Technical Committee for Quality* der EURAMET (TC-Q) im Rahmen des CIPM Mutual Recognition Arrangement (CIPM MRA) regelmässig überprüft.

Erdbeben mit Glasfasernetzwerken aufspüren

Ein neuer technologischer Durchbruch nutzt bestehende Glasfasernetzwerke, um Erdbeben über grosse Entfernungen zu detektieren. Die Technologie beruht auf aktiver Phasenrauschunterdrückung und wurde ursprünglich zur Verbreitung von optischen Referenzfrequenzen entwickelt. Die Anwendung auf seismische Phänomene könnte nun dazu beitragen, dass Erdbeben schneller und präziser entdeckt werden und so einen besseren Schutz vor Naturkatastrophen bieten. Diese Technologie haben Dr. Dominik Husmann und Dr. Jacques Morel vom METAS in Zusammenarbeit mit der Gruppe von Prof. Andreas Fichtner der ETH Zürich demonstriert.

Um die wissenschaftliche Publikation im Magazin «Scientific Reports» zu lesen, scannen Sie den QR-Code.



Die Spedition und speziell ihr Team sind ein Eckpfeiler des METAS. Ohne ihren Einsatz könnten Eichungen, Prüfungen und Kalibrierungen für unsere Kunden nicht abgewickelt werden. Auch die Vergleichskampagnen wären ohne einen zuverlässigen Versand von Messgeräten undenkbar. Zwischen September 2022 und September 2023 hat unsere Logistik beeindruckende

11100

Waresendungen im Empfang genommen und ihren vorgesehenen Empfängerinnen und Empfängern zugestellt.

«Die Rolle der metrologischen Prüfungen wird in der digitalen Welt weiter grosser Bedeutung s

Nach vier Jahren in der Funktion als Bereichsleiter Eichungen und Prüfungen hat Dr. Fabiano Assi Anfang 2023 die Leitung der Abteilung Physik und damit seine neue Rolle als Mitglied der Geschäftsleitung übernommen. Als Abteilungsleiter führt er über 70 Mitarbeitende. Fabiano Assi blickt im Interview zurück und erklärt seine Motivation für den Stellenwechsel.

Interview mit Dr. Fabiano Assi, geführt von Xavier Rappo

Fabiano, du bist seit Januar 2023 Mitglied der Geschäftsleitung des METAS. Was hat dich bewogen, diese Funktion zu übernehmen?

Im Oktober 2022 wurde die Position des Abteilungsleiters für Physik frei, und ich wurde gefragt, ob ich bereit wäre, die Stelle ad interim zu übernehmen. Es war jedoch eine relativ einfache Entscheidung: Ich sah darin die Möglichkeit, wertvolle Erfahrungen zu sammeln und mich in einem Bereich zu engagieren, der mich sehr interessierte. Während meiner Zeit als Interimsleiter im Oktober und im November 2022 konnte ich die Abteilung, die betrieblichen Abläufe und die Mitarbeitenden besser kennenlernen. Mir wurde in dieser Zeit klar, dass diese Position äusserst spannend und herausfordernd ist. Dies führte schliesslich dazu, dass ich mich entschied, mich für die Stelle zu bewerben und sie schliesslich anzunehmen.

Was ist der grösste Unterschied zwischen deiner vorherigen Position als Bereichsleiter Eichungen und Prüfungen und der neuen Position als Abteilungsleiter Physik?

Der grösste Unterschied liegt in der Dimension und der Komplexität der Verantwortlichkeiten. In meiner aktuellen Rolle als Abteilungsleiter für Physik leite ich nun über 70 Mitarbeitende, während es in meiner vorherigen Position knapp 20 waren. Als Mitglied der Geschäftsleitung wurde mir auch schnell bewusst, dass meine Entscheidungen jetzt einen erheblich grösseren Einfluss auf die Organisation haben. Ich kann mich dabei aber immer auf die Unterstützung meiner Kollegen in der Geschäftsleitung verlassen und mich mit meinen Mitarbeitenden austauschen.

ogischen
ner
hin von
ein.»



Dr. Fabiano Assi ist seit dem 1. Januar 2023 der neue Leiter der Abteilung Physik am METAS.

Vorher warst du in der Materialwissenschaft und im Innovationsmanagement tätig, was mehr praxisbezogen war. Vermisst du in deiner neuen Funktion nicht den Praxisbezug?

Der praktische Bezug ist keineswegs verloren gegangen, sondern ist nach wie vor allgegenwärtig. Ich bekomme täglich Informationen von verschiedenen Projekten, tausche mich regelmässig mit den Mitarbeitenden in den Laboren und den Bereichsleitenden über neue Entwicklungen und verschiedene Aktivitäten aus. Darüber hinaus stehe ich in engem Kontakt mit Kundinnen und Kunden sowie Partnern. Zwar handelt es sich nicht mehr um direkte, praktische Tätigkeiten im Labor, doch der indirekte Bezug zur Technik ist nach wie vor vorhanden, was mir sehr wichtig ist.

Du hast bis Ende 2022 fünf Jahre den Bereich Eichungen und Prüfungen geleitet. Worauf bist du besonders stolz in dieser Zeit?

Besonders stolz bin ich auf die Diskussionen und die Entwicklung der Vision METAS 2025, die in den Jahren 2019 und 2020 stattgefunden haben. Ich hatte die Möglichkeit, diese Vision teilweise mitzugestalten. Ebenso war die Neuorganisation des Bereichs Eichungen und Prüfungen ein bedeutender Schritt. Als ich den Bereich im Jahr 2018 übernommen habe, war er in einer völlig anderen Struktur aufgestellt. Ausserdem freue ich mich über meine Mitwirkung an Projekten, wie der Überarbeitung des Zulassungsprozesses und auch der Organisation der Tagung Strassenverkehr im September 2022. All diese Erfahrungen haben mich persönlich bereichert und gezeigt, wie Veränderungen und gemeinsame Visionen umgesetzt werden können.



Dr. Fabiano Assi fotografiert in seiner Freizeit gern und hat mit den in seinem Büro aufgehängten Bildern an einem Wettbewerb teilgenommen.

Und worauf bist du weniger stolz?

Eine enttäuschende Erfahrung waren die Projekte und Anträge im Bereich autonomes Fahren, an denen ich als Bereichsleiter beteiligt war. Wir haben verschiedene Ansätze verfolgt und versucht, gemeinsame Projekte mit anderen Metrologieinstituten zu initiieren. Leider wurden unsere Projekte nicht angenommen. Wir haben Zeit und Ressourcen investiert, ohne den gewünschten Erfolg zu erzielen.

Blicken wir in die Zukunft: Im Tätigkeitsbericht 2022 kann man «Gut aufgestellt für die Herausforderungen von morgen» lesen. Was bedeutet dies konkret für deine Abteilung? Welches sind diese Herausforderungen?

Für unsere Abteilung bedeutet dies konkret, dass wir uns auf die Entwicklungen im Bereich der Metrologie vorbereiten müssen, insbesondere in Bezug auf genauere und komplexere Messinstrumente und Messsysteme. Es geht darum, heute zu verstehen und aufzubauen, was in Zukunft benötigt wird. Derzeit stehen verschiedene Themen im Vordergrund, darunter Digitalisierung, Quantenphysik und generell präzisere Messinstrumente beziehungsweise Messinstrumente mit kleineren Messunsicherheiten. Wir müssen genau verstehen, welche technischen Anforderungen künftig gestellt werden und wie die Metrologie dazu beitragen kann, diese Bedürfnisse zu erfüllen. Unsere Abteilung muss flexibel und anpassungsfähig sein, um auf diese sich ständig entwickelnden Herausforderungen reagieren zu können.

Und wie lassen sich diese Herausforderungen meistern?

Für die Abteilung Physik bedeutet die Vorbereitung auf die Herausforderungen von morgen, dass wir vor allem vor strategischen Entscheidungen stehen. Im Vergleich zu anderen Metrologieinstituten ist das METAS ein kleineres Institut und verfügt nicht über die Mittel und Ressourcen, um alle Themen und Projekte in der Tiefe zu verfolgen. Daher müssen wir sorgfältig abwägen, welche Bereiche und Projekte wir verfolgen. Wir müssen kluge Entscheidungen treffen, um sicherzustellen, dass wir die relevanten Entwicklungen nicht verpassen und gleichzeitig unsere begrenzten Ressourcen effizient nutzen. Dies erfordert eine kontinuierliche Bewertung und Anpassung unserer Strategien und Prioritäten.

Wohin geht die Reise der Metrologie für die Abteilung Physik?

Insgesamt zeigt sich, dass die physikalische Metrologie weiterhin eine zentrale Rolle in der wissenschaftlichen Forschung und in technologischen Anwendungen spielt. Doch sie steht vor verschiedenen Entwicklungen und Herausforderungen: Zum einen geht es darum, die Genauigkeit der Messungen kontinuierlich zu steigern und Messunsicherheiten zu vermeiden. Zum anderen sind vernetzte Messsysteme und Messintelligenz ein zentrales Thema: Der Trend geht in Richtung der Entwicklung von Messsystemen, in denen die verschiedenen



«Der grösste Unterschied liegt in der Dimension und der Komplexität der Verantwortlichkeiten.»

Messinstrumente miteinander vernetzt sind und sich auf mehrere Sensoren stützen, um eine präzise wie auch intelligente Messung durchzuführen. Allerdings müssen noch Standards und Methoden etabliert werden, um solche vernetzten Messsysteme zu testen und zu validieren.

Die ständige Verbesserung der Genauigkeit und die Integration von neuen Technologien werden dazu beitragen, die Metrologie in Zukunft noch relevanter zu machen.

Werden auch in Zukunft metrologische Prüfungen notwendig sein? Heute ist fast alles digitalisiert, da kann ja nichts mehr falsch gemessen werden.

Metrologische Prüfungen werden auch in Zukunft notwendig sein, selbst in einer digitalen Welt. So sind natürliche Prozesse, wie chemische Reaktionen oder physikalische Phänomene, grundlegend analog. Die Digitalisierung tritt erst auf, wenn diese Prozesse gemessen und die Daten in digitale Formate übertragen werden. Daher werden metrologische Prüfungen benötigt, um die Genauigkeit und die Zuverlässigkeit dieser Messungen sicherzustellen.

Hinzu kommt, dass metrologische Prüfungen insbesondere für Algorithmen und KI-Systeme eine Rolle spielen werden. Diese Systeme verarbeiten und analysieren digitale Daten, aber die Qualität und Genauigkeit der Eingangsdaten ist und bleibt entscheidend. Metrologische Prüfungen sind aber darüber hinaus auch erforderlich, um sicherzustellen, dass die Daten, die von solchen Systemen verarbeitet werden, immer noch verlässlich sind. Insgesamt wird die Rolle der metrologischen Prüfungen in einer digitalen Welt weiterhin von grosser Bedeutung sein, um die Rückführbarkeit der Daten sicherzustellen und die Zuverlässigkeit der Messsysteme zu gewährleisten.

Wie kann das METAS am meisten von deinen Erfahrungen profitieren?

Insgesamt biete ich eine breite Palette an Fähigkeiten und Erfahrungen, die dazu beitragen können, das METAS in seiner Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu stärken und die Umsetzung seiner Ziele voranzutreiben.

Meine über elf Jahre in der Solar- und Halbleiterindustrie haben mich in einem äusserst dynamischen Umfeld arbeiten lassen. Das METAS kann von meiner Fähigkeit profitieren, «out of the box» zu denken und kreative Lösungen für komplexe Herausforderungen zu finden.

Meine Erfahrung im Umgang mit Kundinnen und Kunden aus verschiedenen Ländern und Kulturen ermöglicht es dem METAS zudem, seine Kundenbeziehungen zu stärken und international wettbewerbsfähig zu sein. Und meine Erfahrung in grossen, standortübergreifenden Projekten hilft dabei, effektive Projektmanagementpraktiken im METAS zu etablieren und die Durchführung von Projekten zu optimieren.

Dank meinem akademischen Hintergrund, an Universitäten sowohl in der Schweiz als auch in den USA, bringe ich schliesslich fundierte Forschungserfahrung mit. Dies erlaubt es mir, die wissenschaftliche Exzellenz im METAS zu fördern und Forschungs- und Innovationsprojekte voranzutreiben. ●

«Die ständige Verbesserung der Genauigkeit und die Integration von neuen Technologien werden dazu beitragen, die Metrologie in Zukunft noch relevanter zu machen.»



Über das METAS

10 Jahre als eidgenössisches Institut

Was 1862 als Eidgenössische Eichstätte begann, ist heute das Eidgenössische Institut für Metrologie METAS. Seit 2013 ist das METAS ein eidgenössisches Institut, also eine dezentrale Einheit der Bundesverwaltung mit eigener Rechtspersönlichkeit und eigener Rechnung. Seine ersten zehn Jahre als eidgenössisches Institut feierte das METAS im vergangenen Juni. Bei diesem Anlass stand seine Rolle als vertrauenswürdige Referenz für genaue Messungen und zuverlässige Ergebnisse im Zentrum – im Artikel blicken wir zurück auf die Anfänge und insbesondere auf die letzten zehn Jahre.

Im September 1862 beschloss der Bundesrat die Gründung einer Eidgenössischen Eichstätte, einer Vorläuferinstitution des heutigen METAS. In den mehr als 160 Jahren seines Bestehens hat sich das METAS stets den Erfordernissen der Zeit angepasst, sowohl in Bezug auf die wissenschaftlich-technische Entwicklung als auch, was die Organisation betrifft. Was als Eidgenössische Eichstätte begann, wurde zum Eidgenössischen Amt für Mass und Gewicht (AMG), anschliessend zum Eidgenössischen Amt für Messwesen (EAM), gefolgt vom Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung METAS, und schliesslich wurde aus dem Bundesamt für Metrologie METAS das Eidgenössische Institut für Metrologie METAS.

Vom Bundesamt zum eidgenössischen Institut

Vor gut zehn Jahren, auf den 1. Januar 2013, wurde das damalige Bundesamt in eine öffentlich-rechtliche Anstalt mit eigener Rechtspersönlichkeit und eigener Rechnung überführt. Dadurch hat das METAS mehr Selbstständigkeit erhalten, um seine Aufgaben effizienter erfüllen zu können. Eine flexiblere Organisationsform ist wesentlich, um den technologischen Herausforderungen, denen sich ein nationales Metrologieinstitut zu stellen hat, möglichst gut begegnen zu können. Gleichzeitig legt es die gesellschaftliche und wirtschaftliche Bedeutung eines nationalen Metrologieinstituts nahe, nicht auf die Anbindung an den Staat zu verzichten.

Zuverlässiges Messen sicherstellen

Die grundlegenden Aufgaben sind über all die Jahre gleichgeblieben: Das METAS hat den Auftrag, dafür zu sorgen, dass in der Schweiz mit der Genauigkeit gemessen werden kann, die für Wirtschaft, Forschung und Gesellschaft erforderlich ist. Es muss weiter sicherstellen, dass die im Handel und im Verkehr sowie für den Schutz und die Sicherheit von Mensch und Umwelt notwendigen Messungen richtig und vorschriftsgemäss durchgeführt werden können.

Zuverlässige Metrologie ist die Grundlage, um Vertrauen in Messungen aller Art im täglichen Leben zu schaffen – das war in der Vergangenheit so, das ist heute der Fall und wird auch in Zukunft gelten.

Neue Themen und Gebiete

Um Leuchten verlässlich charakterisieren zu können, war und ist die Metrologie in der Optik wesentlich. In der Beleuchtungstechnik spielen heute Sensoren eine immer wichtigere Rolle, denn sie tragen zum Energiesparen bei. Vor drei Jahren hat das METAS ein Prüflabor aufgebaut, um solche Bewegungs- und Präsenzmelder prüfen zu können. Dieses neu aufgebaute Prüflabor ist auch ein Beispiel für Entwicklungen, die in den zehn Jahren des METAS als Institut stattgefunden haben. Es ist eine neue Einrichtung auf einem Gebiet, auf dem das METAS schon länger erfolgreich tätig ist: der Optik. Das METAS hat aber in den letzten Jahren auch auf neuen Gebieten Einrichtungen aufgebaut, so zum Beispiel im Bereich der Biologie und der Labormedizin.



Die Besucher zeigten reges Interesse an den Messeeinrichtungen des METAS am Kundentag.



In der Labormedizin gewinnen zunehmend rückführbare Messungen, wie sie in der Physik und in Teilen der Chemie üblich sind, an Bedeutung. Das METAS spezialisiert sich in diesem Bereich auf die Nukleinsäure-Metrologie. Um als verlässlicher Ansprechpartner und Dienstleister auf diesem Gebiet zur Verfügung stehen zu können, hat das METAS ein Biogelabor aufgebaut, das im Herbst 2021 in Betrieb genommen werden konnte.

Neue Aufgaben

Die Entwicklung des Instituts zeigt sich auch in den Zahlen: 2013 wies das METAS einen Personalbestand von 151 Vollzeitstellen auf, heute sind es 239 – Ausbildungsstellen inbegriffen. Das METAS engagiert sich stark in der Berufsbildung, was sich am hohen Anteil der Lernenden zeigt: 2022 betrug der Anteil 8,4 Prozent des gesamten Personals.

Die Zunahme des Personalbestands ist zum einen darauf zurückzuführen, dass das METAS neue Aufgaben und die dazugehörigen Einrichtungen übernommen hat. So hat das METAS seine chemisch-analytischen Labortätigkeiten mehrfach erweitert: 2017 wurde das Zolllabor der damaligen Eidgenössischen Zollverwaltung (EZV) ins METAS integriert und auf Anfang dieses Jahres die Labore des Bundesamtes für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen (BLV).

Vertrauenswürdige Referenz

Seitdem es 1862 als Eidgenössische Eichstätte gegründet worden war, hat sich das METAS also stets den Erfordernissen der Zeit angepasst, sowohl was die wissenschaftlich-technische Entwicklung wie auch die Organisation betrifft. Seit gut zehn Jahren erfüllt das METAS nun als eidgenössisches Institut seine Rolle als vertrauenswürdige Referenz für genaue Messungen und zuverlässige Ergebnisse in verschiedenen Branchen.

Anpassung der Organisation

Das METAS hat auch seine Strukturen und Prozesse laufend den technologischen und gesellschaftlichen Anforderungen angepasst. Im Jahr 2019 wurde eine eigenständige Abteilung «Chemie» beziehungsweise mittlerweile «Chemie und Biologie» geschaffen, um die zunehmende Bedeutung metrologischer Rückführbarkeit in Chemie und Biologie zum Ausdruck zu bringen. Es wurden neue Bereiche eingerichtet, wie Digitale Transformation, Data Science sowie Kundenbetreuung und Kommunikation. ●

Objekt

Konformitätszeichen



METAS-Cert zertifiziert Hersteller und ihre Messgeräte, damit die CE-Konformitätskennzeichnung und das metrologische M für einen geregelten Gebrauch angebracht werden können.

Die Markierung zeigt die Konformität mit den spezifischen europäischen Anforderungen an das Produkt an, das dann innerhalb der Union frei zirkulieren kann.

So finden Sie unsere Nummer 1259 auf verschiedenen Instrumenten, unter anderem auf Waagen, elektrischen Energiezählern oder, in einem freundlicheren Kontext, auf Gläsern.

Zertifizierte Referenzmaterialien: Metrologie im Dienste der Lebensmittelsicherheit



Proteinreiche Lebensmittel wie Milchprodukte können unterschiedlichste Verunreinigungen in sich tragen, was eine Gefährdung für die Verbraucherinnen und Verbraucher bedeuten kann. Dank des METAS-Referenzmaterials können die Konsumentinnen und Konsumenten Vertrauen in die Lebensmittelsicherheit haben.

Wie garantieren wir, dass unsere Lebensmittel sicher und gesundheitlich unbedenklich sind? Die METAS-Forschenden haben kürzlich ein neues zertifiziertes Referenzmaterial für die Bestimmung von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) und toxischen Elementen auf der Basis von Molkenprotein entwickelt. Damit können diese gefährlichen Verunreinigungen in unserer Nahrung zuverlässig und metrologisch rückführbar auf Referenzwerte bestimmt werden.

Sichere Lebensmittel dürfen kein Zufall sein

Lebensmittelsicherheit ist heutzutage in aller Leute Munde. Mit steigendem Bewusstsein für gesunde Ernährung möchten wir auch sicher sein, dass unser Essen frei von schädlichen Substanzen ist. So fordert die Weltgesundheitsorganisation (WHO) denn auch eine bessere Untersuchung der Auswirkungen von Chemikalien auf die durch Lebensmittel übertragene Krankheitslast. Hierfür sind mehr Überwachungsdaten der Kontaminanten (Verunreinigungen) in Lebensmitteln erforderlich, die auf genauen und metrologisch rückführbaren Messresultaten basieren.

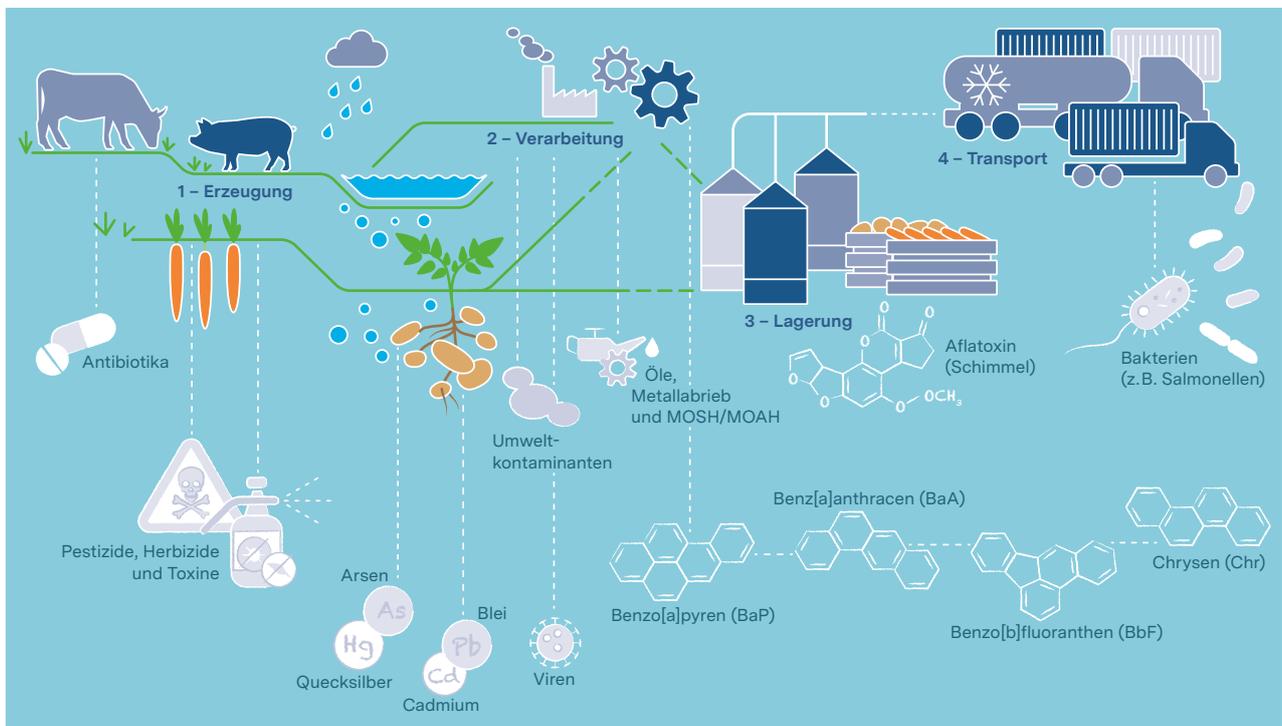
PAK und Elemente: unsichtbare Bedrohungen in unserer Nahrung

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) sind schädliche organische Verbindungen, die aus Kohlenwasserstoffen mit mindestens zwei verbundenen aromatischen Ringsystemen bestehen. Sie entstehen primär bei der unvollständigen Verbrennung organischer Materie. Mehrere dieser PAK-Verbindungen sind als genotoxisch (DNS-schädigend) und karzinogen (krebsregend) eingestuft.¹

Sie können in verschiedenen Lebensmitteln (z. B. in Getreideprodukten, geräuchertem oder über dem Feuer grilliertem Fleisch und Fisch, pflanzlichen Ölen und Fetten, Tee und Kaffee) auftreten und bedeuten ein Gesundheitsrisiko für den Menschen. Die Kontamination von Lebensmitteln mit PAK kann durch belastete Umwelt (Boden, Wasser, Luft), durch die Verarbeitung (industriell oder zu Hause) sowie durch Verpackungsprozesse und -materialien erfolgen. Ihre geringe Wasserlöslichkeit und lipophile (fettliebende) Eigenschaft ermöglicht es den PAK, sich leicht in Lebensmittelprodukten anzusammeln.

Ebenso schädlich, da giftig für Mensch und Tier, ist das Vorkommen von Elementen wie Arsen (As), Blei (Pb), Cadmium (Cd) und Quecksilber (Hg) in der Umwelt und als Folge davon in unserer Nahrung.

Die Höchstmengen der vier PAK Benzo[a]pyren (BaP), Benz[a]anthracen (BaA), Benzo[b]fluoranthen (BbF) und Chrysen (Chr) sowie der toxischen Elemente As, Cd, Hg und Pb in Lebensmitteln werden daher in der Europäischen Union (EU) und der Schweiz mittels Verordnungen² reguliert.



Lebensmittel können durch gefährliche Schadstoffe unterschiedlichster Art verunreinigt werden.

Wie kontrollieren wir das zu Kontrollierende?

Um die Einhaltung der regulatorischen Grenzwerte und den Verbraucherschutz sicherzustellen, werden chemische Kontaminanten in Lebensmitteln analysiert. Dies erfolgt durch Lebensmittelkontrolllabore mittels präziser, zuverlässiger und erprobter analytischer Methoden. Dazu sind in der Regel eine komplexe und matrixabhängige Probenvorbereitung sowie ausgereifte Messverfahren notwendig, die sowohl Extraktion (Herauslösung, Isolierung) als auch Aufreinigung, Aufkonzentrierung und Messung umfassen. Dabei muss die Matrix, das ist der Gesamtkomplex einer Probe, in dem der zu analysierende Stoff eingebettet ist, berücksichtigt werden – also alles, was nicht analysiert werden soll.

Zertifizierte Referenzmaterialien (ZRM) spielen in diesem Zusammenhang eine Schlüsselrolle, zum einen bei der Entwicklung, Validierung und Leistungsbewertung solcher Analysemethoden, zum anderen bei der Sicherstellung der metrologischen Rückführbarkeit der Messresultate auf eine einheitliche Referenz (das internationale Einheitssystem SI).

Das Prinzip des Einsatzes von ZRM ist an sich einfach: Wenn der Analyseprozess (oder allenfalls «nur» das Analysegerät) die im ZRM durch den Hersteller angegebenen zertifizierten Werte für die Verunreinigungen innerhalb der geforderten Messunsicherheit korrekt hervorbringt, ist das Vorgehen «fit» für die Untersuchung realer Prüfproben. Mithilfe des ZRMs kann somit der gesamte analytische Prozess des jeweiligen Labors überprüft und bei Bedarf angepasst werden.

In den letzten Jahren ist der Bedarf an ZRM für die Analyse von Kontaminanten in Lebensmitteln, einschliesslich der PAK und der toxischen Elemente, zunehmend gestiegen. Da es bisher aber noch zu wenige solcher kommerziell erhältlichen Referenzprodukte gibt, wird die Qualitätskontrolle zur Gewährleistung der Lebensmittelsicherheit in Laboratorien erschwert.

Das zertifizierte Referenzmaterial aus dem METAS

Eine Gruppe von Forschenden des Bereichs «Chemische und biologische Metrologie» am METAS hatte sich zum Ziel gesetzt, ein ZRM für die Analyse der vier PAK BaA, BaP, BbF und Chr sowie der Elemente

As, Cd, Hg und Pb in einem proteinreichen Lebensmittel – in diesem Fall eine hochproteinhaltige Matrix aus Molkenproteinpulver – zu entwickeln und zu charakterisieren (Beschreibung/Bestimmung gewisser Eigenschaften, Merkmale und Qualitäten eines Stoffes). Entstanden ist das ZRM mit dem «klingenden» Namen WP-CBR001.

Obwohl Molkenprotein in den relevanten Verordnungen für PAK und toxische Elemente nicht ausdrücklich als Lebensmittel aufgeführt ist, kann es als Modell für Matrizen mit hohem Proteingehalt verwendet werden. Molkenproteinpulver wird aus Molke hergestellt, einem flüssigen Nebenprodukt der Käseproduktion, und steht daher in grossen Mengen in der Milchindustrie zur Verfügung. Aufgrund seines hohen Gehalts an essenziellen Elementen und Aminosäuren hat Molkenproteinpulver einen hohen Nährwert und ist einer der am häufigsten verwendeten Lebensmittelzusatzstoffe weltweit. Wie bei vielen anderen Lebensmittelzusatzstoffen und Nahrungsergänzungsmitteln kann auch beim Molkenprotein eine Kontamination durch PAK und toxische Elemente aufgrund von Umweltverschmutzung, Produktionsprozessen oder Verpackungsmaterialien nicht ausgeschlossen werden.

Design der ZRM-Entwicklung

Die Entwicklung von WP-CBR001 mit den Zielanalyten BaA, BaP, BbF und Chr und den Elementen As, Cd, Hg und Pb wurde als gemeinsames Projekt des METAS, der Sigma-Aldrich Production GmbH (Tochtergesellschaft von Merck KGaA, Darmstadt, Deutschland) und der Hochdorf Swiss Nutrition Solutions AG durchgeführt und bestand aus den im nebenstehenden Ablaufplan aufgeführten Hauptetappen (basierend auf [3] und [4]).

Herstellung von WP-CBR001

Das kommerziell erhältliche, industriell produzierte Molkenproteinpulver hat sich als frei von den Ziel-PAK und Zielelementen erwiesen, weswegen flüssige Molke vor der weiteren Verarbeitung zum ZRM aktiv mit BaA, BaP, BbF, Chr, As, Cd, Hg und Pb kontaminiert werden musste. Der gesamte Produktionsprozess des WP-CBR001 wurde analog demjenigen in der Industrie gehalten. Entsprechend entstand ein ZRM mit einem Probenvorbereitungsverhalten ähnlich echtem Molkenproteinpulver.



Ablaufplan der Hauptetappen zur Entwicklung des METAS-ZRMs WP-CBR001.

Da die Massenanteile von PAK und toxischen Elementen in Molkenproteinpulvern in der EU und in der Schweiz nicht ausdrücklich geregelt sind, trafen die METAS-Forschenden eine sinnvolle Annahme der Zielmassenanteile für jeden der vier PAK und jedes der vier toxischen Elemente.

Der Molkenrohstoff, welcher aus einem konventionellen industriellen Produktionsstrom entstammte, wurde anschliessend unter Verwendung einer Spike-Lösung mit den vier PAK und den vier toxischen Elementen kontaminiert. Nach der Zugabe aller Kontaminanten wurde die verunreinigte Molke schliesslich in einer industriellen Versuchsanlage sprühgetrocknet. Das Ergebnis war ein Molkenproteinpulver, welches in seinen Hauptbestandteilen einem unter ähnlichen Bedingungen wie WP-CBR001 kommerziell hergestellten Molkenproteinpulver entspricht. Es weist die folgenden Nährwerte auf:

Inhaltsstoff	Massenanteil (g/100 g)
Protein	77
Kohlenhydrate	10
Fett	6
Wasser	5
Anderes	2

Dieses Endprodukt wurde in rund 700 durchnummerierte Glasflaschen à 30-g-Portionen abgefüllt und tiefgekühlt gelagert.

Die Qualität von WP-CBR001 passt!

Für die Homogenitätsstudie wurden zehn zufällig ausgewählte Flaschen in je drei Analysedurchgängen untersucht. Sowohl innerhalb als auch zwischen den Flaschen konnte dabei keine statistisch signifikante Inhomogenität beobachtet werden.

Für die Stabilitätsstudie wurden ausgewählte Flaschen getrennt bei verschiedenen Lagertemperaturen (-20 °C, 4 °C, Raumtemperatur, 45 °C) über einen Zeitraum von bis zu 12 Monaten gelagert und anschliessend analysiert. Eine statistisch relevante Instabilität konnte, selbst bei Raumtemperatur und kurzzeitig sogar bei höheren Temperaturen, nicht festgestellt werden. In der darauffolgenden Charak-

terisierung wurden die Massenanteile (Gehalte) der acht eingebrachten Kontaminanten in den Laboren des METAS präzise bestimmt. Anschliessend wurde eine Abschätzung der Unsicherheit dieser Werte unter Einbezug aller Einflussgrössen vorgenommen.

Schliesslich konnten die zertifizierten Werte des Referenzmaterials WP-CBR001 mittels einer durch ausgewählte Kontrolllabore in der Schweiz und Deutschland durchgeführten Gegenanalyse unter realen Laborbedingungen (Ringversuch) bestätigt werden. Eine weitere Konfirmation lieferten die gravimetrischen Werte aus der Massenbilanz der Produktion, indem die genaue Menge an zugegebenen Kontaminanten in der Gesamtmenge des Endproduktes ja bekannt war. Eine wichtige Erkenntnis aus dem Ringversuch war, dass eine vollständige Extraktion der vier PAK ausschliesslich mithilfe von polaren und protischen Lösungsmitteln (z.B. Wasser und Methanol) gelang. Dieses Wissen wird zukünftig wichtig sein, um neue standardisierte Analysemethoden zu etablieren.

Ein wichtiges Produkt aus den Laboren des METAS

Der Schutz der Verbraucherinnen und Verbraucher vor gesundheitsgefährdenden Kontaminanten ist eine wichtige Aufgabe von Lebensmittelsicherheitslaboren. Zur Kontrolle der gesetzlichen Vorschriften werden viele unterschiedliche Analyseprozesse verwendet. Da die erforderlichen Probenvorbereitungen zwischen verschiedenen Lebensmittelmatrizes erheblich variieren können, ist die Wahl eines ZRMS, das dem untersuchten Lebensmittel nahekommt, entscheidend.

Das vom METAS entwickelte zertifizierte Referenzmaterial WP-CBR001 auf der Basis von Molkenprotein kommt einer potenziell kontaminierten, proteinreichen realen Lebensmittelmatrix sehr nahe. WP-CBR001 kann zur genauen und rückführbaren Bestimmung der Massenanteile der vier PAK BaA, BaP, BbF und Chr⁵ sowie der vier Elemente As, Pb, Cd und Hg in Lebensmitteln eingesetzt werden. Das Produkt ist bereits auf dem Markt erhältlich und dient den Lebensmittelkontrolllaboren dazu, ihre Analysemethoden zu verbessern oder zu überprüfen, um vergleichbare und valide Resultate zu erhalten.



- 1 World Health Organization and Food and Agriculture Organization of the United Nations. Evaluation of certain food additives and contaminants. Prepared by the sixty-seventh meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. Rome; Italy. 2007. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/43592>.
- 2 Verordnung (EU) 2023/915 der Kommission vom 25. April 2023 über Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 (Text von Bedeutung für den EWR). Of J Eur Union. 2023;119:103–57. Und Verordnung des EDI über die Höchstgehalte für Kontaminanten (Kontaminantenverordnung, VHK) vom 16. Dezember 2016 (Stand am 1. Juli 2020). SR 817.022.15.
- 3 International Organization for Standardization. General requirements for the competence of reference material producers. ISO 17034. Geneva: ISO. 2016.
- 4 International Organization for Standardization. Reference materials – guidance for characterization and assessment of homogeneity and stability. ISO Guide 35. Geneva: ISO. 2017.
- 5 S. Lobsiger, L. Märki, S. Mallia, G. Umbricht, H. Sprecher, K. Breittrück, M. Obkircher, Development of a novel certified reference material for the determination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in whey protein powder, Anal Bioanal Chem (2023), <https://doi.org/10.1007/s00216-023-04863-9>.

Vertrieb Referenzmaterial:

Schweiz: references@metas.ch

International: sigmaaldrich.com



Das neue ZRM aus dem METAS: WP-CBR001 vor einer der rund 700 Flaschen à 30 g.

Zertifizierte Werte im Referenzmaterial WP-CBR001

Kontaminante: PAK	Massenanteil ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	Unsicherheit ($\mu\text{g}/\text{kg}$)
Benz[a]anthracen (BaA)	3,17	0,32
Benzo[a]pyren (BaP)	4,18	0,48
Benzo[b]fluoranthen (BbF)	4,73	0,49
Chrysen (Chr)	2,85	0,33

Kontaminante: toxische Elemente	Massenanteil (mg/kg)	Unsicherheit (mg/kg)
Arsen (As)	0,214	0,033
Blei (Pb)	0,494	0,032
Cadmium (Cd)	0,200	0,019
Quecksilber (Hg)	0,555	0,011

Die Unsicherheit der zertifizierten Werte in beiden Tabellen ist die erweiterte Unsicherheit unter Verwendung eines Erweiterungsfaktors $k=2$, was einem Vertrauensintervall von etwa 95 % entspricht.

Ein Bier in einer Minute oder in dreissig Jahren zapfen dank flexibler präziser Durchflüsse

Die Kalibrierung von Durchflussmessgeräten ist in vielen Bereichen wie Pharmazie, Flow Chemistry und Mikrofluidik-Anwendungen, in denen es auf die Dosierung von Prozessflüssigkeiten oder präzise Durchflussmessungen ankommt, ein wichtiger Aspekt. In diesem Zusammenhang hat das METAS Anlagen mit selbst konzipierten Kolben entwickelt, mit denen Durchflussmengen prozessorientierter Flüssigkeiten mit nicht konstanten Durchflussprofilen möglich sind. Der geringstmögliche Durchfluss erlaubt ein Bier in dreissig Jahren zu zapfen.

Dr. Hugo Bissig, Martin Tschannen, Dr. Marc de Huu

Die Dosierung von Prozessflüssigkeiten oder die genaue Messung des Durchflusses sind Verfahren, die in der Industrie eingesetzt werden. Die betreffenden Durchflussmessgeräte können kalibriert werden, um Angaben zur Genauigkeit und Präzision der Durchflussmessungen sowie deren Langzeitstabilität zu erhalten. Durch dynamische Änderungen des Durchflussprofils zur Simulation beliebiger Dosierungsprozesse lassen sich wichtige Einblicke in das Verhalten der betreffenden Durchflussmessgeräte und ihrer Genauigkeit unter nicht konstanten Durchflussbedingungen gewinnen. Auch die prozessorientierte Flüssigkeit selbst kann die Leistung des Durchflussmessgeräts beeinflussen.¹

Das METAS hat Anlagen mit selbst konzipierten Kolben entwickelt, mit denen Durchflussmessungen prozessorientierter Flüssigkeiten mit nicht konstanten Durchflussprofilen möglich sind. Der geringstmögliche Durchfluss entspricht der Durchflussmenge, um ein Bier in dreissig Jahren zu zapfen.²⁻⁴ Der Durchfluss der METAS-Kolben-Kalibrieranlagen kann innerhalb von Sekunden geändert werden. Der erzeugte Durchfluss ist auf Grundlage der kalibrierten Positionsmessung und des Kolben-Innendurchmessers

rückführbar. Auch die gravimetrische Methode der Microflow-Anlage hat ein Upgrade erfahren: ein Kapillar-Messbecher, bei dem eine vertikale Kapillare montiert ist und die Auslassnadel oben in die Kapillare eingeführt wird, um die Wasseraufnahme zu ermöglichen. Dies minimiert die Instabilitäten der Wägedaten bei sich änderndem Durchfluss^{3,5} (Abbildung 3).

METAS-Kolben als Primärnormale

Die METAS-Kolben erzeugen Durchflüsse, die dem Zapfen eines Biers über einen Zeitraum von fast einer Minute bis zu dreissig Jahren hinweg entsprechen, in Zahlen 400 mL/min bis 20 nL/min²⁻⁴ (siehe Abbildung 1). Erzeugt werden diese Durchflüsse mit handelsüblichen Glasspritzen oder eigens angefertigten Kolben mit Volumen zwischen 0,05 mL und 200 mL. Die zugehörigen Geschwindigkeitsbereiche der Kolben reichen von 0,1 mm/s bis 0,1 µm/s bei der Microflow-Anlage und von 4,0 mm/s bis 4,0 µm/s bei der Milliflow-Anlage. Die METAS-Kolben sind Primärnormale für den Volumen-Durchfluss, da die Kolbengeschwindigkeit und der Innendurchmesser des Kolbens kalibriert und auf Länge und Zeit beziehungsweise auf Länge rückführbar sind. Aus der Multiplikation von Geschwindigkeit und Kolbenquerschnitt ergibt sich der rückführbare Durchfluss.

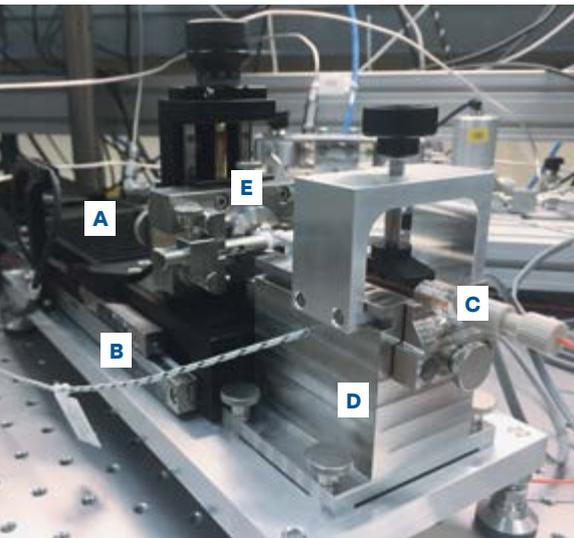


Abbildung 1: METAS-Kolben der Microflow-Anlage. (A) hochpräziser Lineartisch, (B) Linear-Messsystem, (C) Spritze, (D) Spritzenhalterung, (E) Halterung und Positionierung des Spritzenstempels. Der Aufbau und die Komponenten des METAS-Kolben der Milliflow-Anlage sind identisch, arbeiten aber in einem anderen Geschwindigkeitsbereich.

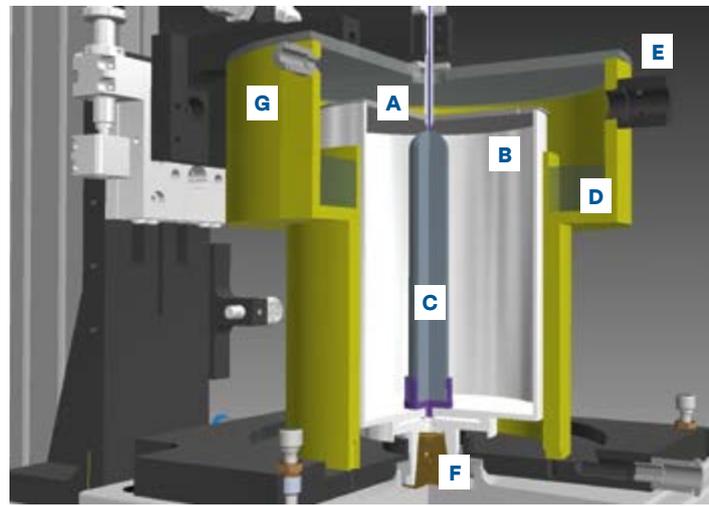


Abbildung 2: Wägebereich der Milliflow-Anlage. (A) Auslassnadel, (B) Messbecher mit Deckel, (C) Glasfilter, (D) Wasser in der Verdunstungsfalle, (E) Halterung für T- und rF-Sensor, (F) Waage, (G) Rohrleitungen für Feuchtetauscher.

Die Kolbenbewegung wird durch einen hochpräzisen Lineartisch mit festem Linear-Messsystem gesteuert. Die vom Linear-Messsystem gesendeten Impulse werden in einem «Field Programmable Gate Array» (FPGA) gezählt. In diesem FPGA läuft ein in die Hardware eingepprägter Programmcode mit definierter konstanter Zykluszeit im Bereich von 25 ns (40 MHz) ab. Bei jedem Impuls in eine beliebige Richtung zeichnet das FPGA einen Zeitstempel auf, der dann der entsprechenden Position zugeordnet wird. Die Hauptsoftware kann dieses Wertepaar auslesen und die Echtzeit-Position aufzeichnen. Mittels einer linearen Approximation über mehrere Positions-Datenpaare hinweg lässt sich daraus die Geschwindigkeit des Lineartisches und somit des Kolbens bestimmen.

Speziell entworfener Becher für das Sammeln der Flüssigkeit

Der METAS-Kolben kann nicht für die Kalibrierung von Durchfluss erzeugenden Geräten wie zum Beispiel hochgenauen Spritzenpumpen oder Insulinpumpen verwendet werden. In diesen Fällen kommt die gravimetrische Methode zum Einsatz, bei der die abgegebene Flüssigkeit in einem Becher auf einer Waage gesammelt wird.³ Die Microflow- und Milliflow-Anlagen sind ähnlich aufgebaut, wobei der Wasserfluss aus der Auslassnadel (siehe Abbildung 2 und Abbildung 3) in den Becher über eine Wasserbrücke zwischen Auslassnadel und der Stelle des Becherkontakts stattfindet. Der Messbecher der Milliflow-Anlage enthält einen vertikal installierten Glasfilter. Die Auslassnadel ist in der Regel je nach Nadeldurchmesser 1 bis 0,3 mm und erzeugtem Durchfluss 200 bis 50 μm oberhalb des Glasfilters positioniert (Abbildung 2).²

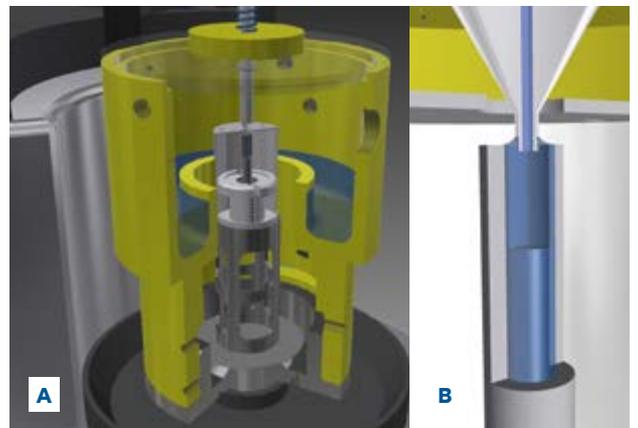


Abbildung 3: (A) Wägebereich der Microflow-Anlage mit Auslassnadel und Messbecher, (B) Innenansicht der Kontaktstelle der Auslassnadel in der Kapillare.

Das Wasser bildet beim Einfließen in den Messbecher eine Wasserbrücke zwischen Auslassnadel und Glasfilter aufgrund der Kapillarkräfte. Das Wasser fließt durch den Glasfilter nach unten zum Becherboden, von wo der Wasserspiegel ansteigt, ohne die Kontaktstelle zu verändern. Der Wasserspiegel steigt dort an, erreicht jedoch nie die Oberkante des Glasfilters. Der Wasserkontakt zwischen Auslassnadel und Glasfilter wird also nicht durch den Wasserstand im Messbecher beeinflusst.

Der Messbecher der Microflow-Anlage enthält eine vertikale Kapillare (Abbildung 3). Die Kapillare wird mit Wasser gefüllt und die Auslassnadel wird innerhalb der Kapillare positioniert.^{3,5} Das Wasser fließt durch die Kapillare in den Messbecher und der Wasserstand im Becher erhöht sich, ohne die Kapillarkräfte an der Kontaktstelle zu verändern.

Messungen der dynamischen Änderungen des Durchflussprofils

Der METAS-Kolben und die gravimetrische Methode arbeiten hinsichtlich der Bestimmung des momentanen Durchflusses ähnlich. Bei dem METAS-Kolben erfasst das FPGA bei jedem Impuls des Linear-Messsystems die Position und den Zeitstempel für die Erzeugung von Datenpaaren. Ein Echtzeitsystem, das mit einer Frequenz von 20 Hz mit der Waage kommuniziert, liest kontinuierlich die Wägedaten aus und verknüpft den Wägewert direkt mit seinem Zeitstempel. Durch eine lineare Approximation der Datenpaare in einem kurzen Zeitfenster von nur einer halben Sekunde lassen sich mit der Methode der kleinsten Quadrate die Momentandurchflüsse des METAS-Kolbens und der gravimetrischen Methode bestimmen.

Mithilfe dieser Messungen des momentanen Durchflusses können die Reaktionszeiten von Durchflussmessgeräten charakterisiert werden. Das Signal des Coriolis-Durchflussmessgeräts wird mit einer Frequenz von 25 Hz aufgezeichnet. Darüber hinaus wird der Mittelwert über eine halbe Sekunde hinweg ermittelt. Abbildung 4 zeigt alle Momentandurchflüsse der Messung mit der Milliflow-Anlage: der METAS-Kolben, die gravimetrische Methode und das Coriolis-Durchflussmessgerät.

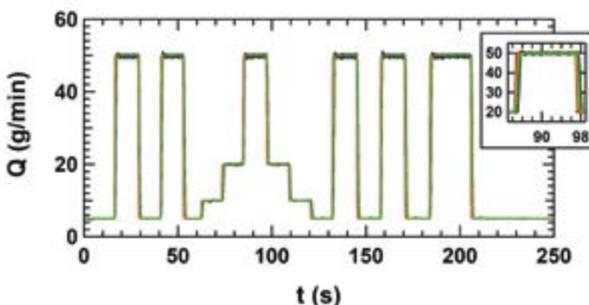


Abbildung 4: der ermittelte Massedurchfluss Q der gravimetrischen Methode (schwarze Linie), des METAS-Kolbens (rote Linie) und des Coriolis-Durchflussmessgeräts (grüne Linie) als Funktion der Zeit t .

Dynamische Durchflussprofile an der unteren Grenze

Für die Messung der dynamischen Durchflussprofile mit der Microflow-Anlage wurde der Kapillar-Messbecher entwickelt. Der Flüssigkeitsmeniskus zwischen Kapillare und Auslassnadel bleibt aufgrund der Kapillarkräfte auch bei starken Veränderungen des Durchflusses nahezu stabil. Um die Funktionalität der Microflow-Anlage hervorzuheben, wurde mit

einem thermischen Durchflussmessgerät ein dynamisches Durchflussprofil im untersten Messbereich aufgezeichnet. Nach einer Stabilisierungszeit von zwei Stunden wurden drei Zyklen mit Schritten von 30 s bei Durchflüssen zwischen 30 nL/min und 100 nL/min erfasst, wie in Abbildung 5 zu sehen ist.

Offensichtlich stösst die gravimetrische Methode bei diesen kleinen Durchflüssen und kurzen Zeitfenstern an ihre Grenzen, wie an den verrauschten Daten (schwarze Linie) in Abbildung 5 zu erkennen ist. Die Auswirkungen der sich ändernden Kapillarkräfte an der Wasser-Kontaktstelle zwischen Auslassnadel und Kapillare sind hier grösser als bei höheren Durchflüssen. Die Daten des METAS-Kolbens (Abbildung 5, rote Linie) und des thermischen Durchflussmessgeräts (Abbildung 5, blaue Linie) folgen jedoch demselben Trend, und die lokalen Geschwindigkeitsschwankungen werden von beiden erfasst. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass der METAS-Kolben den effektiven Durchfluss misst, der generiert wird.

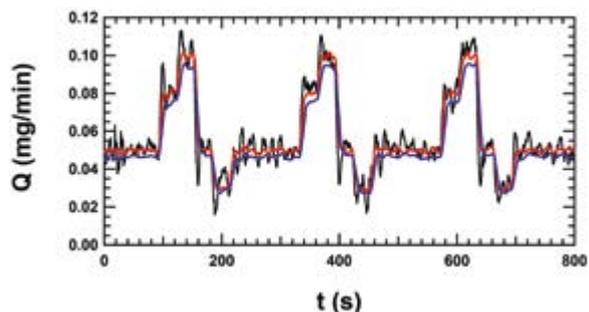


Abbildung 5: vom METAS-Kolben erzeugtes Durchflussprofil (rote Linie) und Messung mit einem thermischen Durchflussmessgerät (blaue Linie). Zusätzlich ist das Ergebnis der gravimetrischen Methode (schwarze Linie) dargestellt.

Diese drei Datenzyklen bieten nun verschiedene Möglichkeiten zur Analyse der Abweichung des thermischen Durchflussmessgeräts im Vergleich zum Referenzdurchfluss des METAS-Kolbens. Zunächst wird die Abweichung des Durchflussmessgeräts für jedes der Plateaus (konstante Durchflüsse) der drei Zyklen bestimmt und der Durchschnitt mehrerer Abweichungen bei jedem Durchfluss berechnet und in Abbildung 6 als volle rote Kreise dargestellt. Diese Abweichungen werden mit den Abweichungen verglichen, die bei der Kalibrierung mit konstantem Durchfluss über mehrere Stunden (voller blauer Kreis) ermittelt wurden, aber nicht bei genau den gleichen Durchflussraten durchgeführt wurden. Für zwei Durchflüsse sind die Ergebnisse sogar bei diesen kurzen Messzeiten konsistent.

Zweitens können die durchschnittlichen Durchflüsse über einen vollen Zyklus bestimmt und mit den Referenzdurchflüssen verglichen werden. Die Abweichungen über einen vollen Zyklus in Bezug auf den Referenzdurchfluss des METAS-Kolbens bzw. der gravimetrischen Methode sind als offener roter Kreis bzw. offener schwarzer Kreis in Abbildung 6 dargestellt. Diese Ergebnisse sind alle innerhalb der angegebenen Messunsicherheiten konsistent.

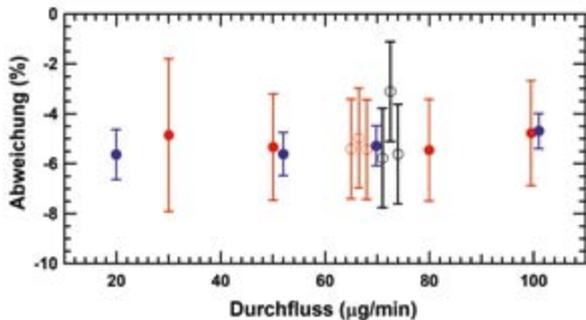


Abbildung 6: die Abweichungen des thermischen Durchflussmessgeräts. Kalibrierung mit konstantem Durchfluss (volle blaue Kreise), Plateauwerte aus der Kalibrierung mit dynamischem Durchflussprofil (volle rote Kreise). Kalibrierung über einen vollen Zyklus mit dem METAS-Kolben (offene rote Kreise) und mit der gravimetrischen Methode (offene schwarze Kreise).

METAS-Kolben garantieren rückführbare Durchflussänderungen

Das METAS hat Anlagen mit METAS-Kolben als Primärnormalen entwickelt, um die anspruchsvolle Messung von nicht konstanten Durchflussprofilen mit prozessorientierten Flüssigkeiten für Durchflüsse bis zu 20 nL/min zu gewährleisten. Die METAS-Kolben erlauben eine sekundenschnelle Änderung des Durchflusses und die erzeugte Durchflussänderung ist aufgrund der kalibrierten Positionsmessung und des Innendurchmessers des Kolbens rückführbar.

Darüber hinaus ermöglicht die gravimetrische Methode die Charakterisierung von Insulinpumpen oder anderen Durchflussgeneratoren. Zudem sind die METAS-Kolben auch Bestandteil eines Rohr-Viskosimeters zur Inline-Bestimmung der dynamischen Viskosität der verschiedensten Flüssigkeiten.⁸ Denken Sie daran, dass dreissig Jahre für das Zapfen eines Biers der niedrigsten Durchflussmenge der Anlage entsprechen. ●

Unsicherheiten des Durchflusses und deren Validierung

Die Unsicherheiten der Anlagen für den Durchflussbereich von 400 L/min bis 20 nL/min reichen von 0,07% bis 1,0% für konstante Durchflüsse und von 0,20% bis 2,0% für dynamische Durchflussprofile. Diese Unsicherheiten bei den niedrigeren Durchflüssen wurden durch einen europäischen Ringversuch im Rahmen des EURAMET-Projekts 1508 validiert, in denen die METAS-Kalibrierergebnisse zweier thermischer Durchflussmessgeräte mit dem Referenzwert konsistent waren.^{4,6}

Charakterisierung von Insulinpumpen

Die gravimetrische Methode der Microflow-Anlage wird auch zur Charakterisierung der Leistung von Insulinpumpen eingesetzt, die in spezifischen Zeitabständen kleine Flüssigkeitsmengen abgeben, um das Insulin quasi kontinuierlich zuzuführen. Der Pumpenmechanismus besteht aus einem Schrittmotor, der den Kolben schrittweise bewegt, wodurch der Kolben in den Behälter gedrückt wird, um das Insulin herauszupressen. Ein diskretes Volumen wird oft als Einzeldosis bezeichnet und entspricht der kleinsten abgegebenen Menge an Insulin. Abhängig von der Basalrate (Insulin-Durchfluss) sind unterschiedlich grosse Einzeldosen und unterschiedliche Zeitintervalle zwischen den Einzeldosen (d. h. Zykluszeiten) erforderlich.⁷

- 1 Bissig H, Tschannen M und de Huu M, "Liquid properties effects on Coriolis and thermal mass flow meters at very low flow rates", in *Flomeko Proc.*, 2019
- 2 Bissig H, Tschannen M und de Huu M, "Recent Innovations in the field of traceable calibration of liquid milli-flow rates with liquids other than water", in *Flomeko Proc.*, 2016
- 3 Bissig H, Tschannen M und de Huu M, "Dynamic vs constant liquid flow calibrations down to 20 nL/min", in *Flomeko Proc.*, 2022
- 4 Mills C, Batista E, Bissig H et al. "Calibration methods for flow rates down to 5 nL/min and validation methodology" *Biomedical Engineering / Biomedizinische Technik*, Bd. 68, Nr. 1, 2023, SS. 13–27. <https://doi.org/10.1515/bmt-2022-0049>
- 5 Wright J D und Schmidt J W, "Reproducibility of Liquid Micro-Flow Measurements", in *Flomeko Proc.*, 2019
- 6 NEL, "Pilot study: Intercomparison of ultra-low liquid flow rates in range below 100 nL/min", Reg.-Nr. 1508, <https://www.euramet.org/technical-committees/tc-projects/>
- 7 Bissig H, Büker O, Stolt K et al. "Calibration of insulin pumps based on discrete doses at given cycle times" *Biomedical Engineering / Biomedizinische Technik*, Bd. 68, Nr. 1, 2023, SS. 67–77. <https://doi.org/10.1515/bmt-2022-0040>
- 8 Bissig H, Büker O, Stolt K et al. "In-line measurements of the physical and thermodynamic properties of single and multicomponent liquids" *Biomedical Engineering / Biomedizinische Technik*, Bd. 68, Nr. 1, 2023, SS. 39–50. <https://doi.org/10.1515/bmt-2022-0039>

Fortschrittliche Aerosol-Metrologie für Atmosphärenwissenschaft und Luftqualität

Luftverschmutzung ist sowohl ein Umwelt- als auch ein gesellschaftliches Problem. Luftschadstoffe aus anthropogenen und natürlichen Quellen werden mit gesundheitlichen Beeinträchtigungen und dem Klimawandel in Verbindung gebracht.

B. Beckhoff, U. Winkler, S. Horender, J. Malet, M.-C. Lépy, S. Koust, S. Seeger, J. Tompkins, K. Vasilatou für das EMPIR-AEROMET-II-Konsortium

Um Vorschriften durchsetzen zu können, die menschliche Gesundheit zu schützen und die Erforschung von Klimawandel und atmosphärischen Prozessen zu ermöglichen, sind genaue Aerosolmessungen unerlässlich. Allerdings stellt die Erfassung der Luftverschmutzung eine komplexe Herausforderung dar, da derzeit rückführbare Mess- und Charakterisierungsmöglichkeiten für Aerosole in der Umwelt fehlen. Hier sorgt das Projekt EMPIR AEROMET II für methodologische Verbesserungen.

Erfolge des Projekts EMPIR AEROMET II Standardisierung von Weich-Röntgen-Aerosol-Neutralisatoren

Soll die Partikelanzahl-Größenverteilung mittels «Mobility Particle Size Spectrometer» (MPSS) gemessen werden, setzt dies die genaue Kenntnis der Ladungsverteilung der Partikel voraus. Der naheliegendste Ansatz, um die Ladungsverteilung zu ermitteln – nämlich die Verwendung eines radioaktiven Ladungskonditionierers für die Erzeugung eines gut bekannten Partikelladungs-Gleichgewichts – ist in vielen Fällen insbesondere aufgrund regulatorischer Vorgaben nicht möglich. Im Rahmen des Projekts EMPIR AEROMET II wurden nun neuartige nicht radioaktive Alternativen einer gründlichen Untersuchung unterzogen (Abbildung 2). Dies erfolgte anlässlich eines Workpackages unter der Leitung des Leibniz-Instituts für Troposphärenforschung (TROPOS). Dabei lag der Hauptschwerpunkt auf den vier kommerziell verfügbaren Weich-Röntgen-

Ladungskonditionierern (SXR CC), die drei Stakeholder aus der Industrie freundlicherweise zur Verfügung stellten. Die Langzeitprüfung ergab, dass sich die durch die geprüften Modelle erzeugten Partikelladungs-Gleichgewichte signifikant voneinander unterscheiden. Darüber hinaus zeigten sich auch Leistungsveränderungen der Geräte im Zeitverlauf, die berücksichtigt werden müssen. Im Rahmen des Projekts wurden ausserdem Versuche mit nicht sphärischen Russpartikeln durchgeführt. Selbst bei radioaktiven Ladungskonditionierern ergaben sich gewisse Unterschiede in der Ladungsverteilung der Partikel – verglichen mit der erzeugten Verteilung bei sphärischen Partikeln gleicher Grösse. Das britische metrologische Institut (*National Physical Laboratory, NPL*) führte weitere Versuche mit Plasma-Ladungskonditionierern durch, die sich allerdings noch im Entwicklungsstadium befinden. Die Aktivitäten standen in direktem Zusammenhang mit der Entwicklung des ISO/DIS19996-Standards «Ladungskonditionierung von Aerosolpartikeln für die Partikelcharakterisierung und die Erzeugung von Kalibrier- und Testaerosolen» innerhalb der ISO TC24/SC4 Working Group 12.

Standardisierung für automatische Pollenmonitore

Für automatische Pollenmonitore gibt es derzeit noch keine Normen oder verfügbaren Kalibrierabläufe, obwohl diese Geräte bald in metrologischen Stationen in ganz Europa installiert werden. Im Rahmen des Projekts AEROMET II gingen die Forschenden



Abbildung 1: AEROMET-II-Konsortium bei einem Treffen in der BAM, Berlin, Deutschland.

unter der Leitung des Eidgenössischen Instituts für Metrologie METAS mit der Entwicklung rückführbarer Kalibrierabläufe für automatische Pollenmonitore im Labor über den aktuellen Stand hinaus. Erstmals konnten automatische Pollenmonitore mit Polystyrol-Partikeln zertifizierter Größen bis zu 20 µm rückführbar kalibriert werden. Die automatischen Pollenmonitore wurden anschliessend auf die Messung von Pollen-Taxa trainiert und werden seit 2021 im Feld eingesetzt. Im Frühjahr 2022 wurden im schweizerischen Payerne und im norwegischen Oslo schliesslich zwei automatische Pollenmonitore mittels eines Vergleichs der gemessenen Pollen-Taxa mit der manuellen Referenzmethode, das heisst der Pollenfalle vom Typ Hirst, evaluiert (Abbildung 3).

Kalibrierung von TXRF-Spektrometern

Das Tischgerät eines Totalreflexions-Röntgenfluoreszenzspektrometers (TXRF der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, BAM), welches zur chemischen Analyse von Aerosolen dient, wurde mithilfe von Bezugsnormen kalibriert. Am deutschen metrologischen Institut (PTB) konnte die vollständige physikalische Rückführbarkeit auf Primärnormale wie

einen auf Synchrotronstrahlung basierenden GIXRF-Aufbau erreicht werden. Dabei wurden satzweise Referenzkalibrierproben hergestellt und erste Labor- und Charakterisierungsmessungen auf Grundlage von Synchrotronstrahlung durchgeführt. Die Wirkung der Kalibrierung auf die Genauigkeit und die Vergleichbarkeit von TXRF-Tischspektrometern mit referenzfreier SR-TXRF (Synchrotronstrahlungs-TXRF) wurde durch Messungen in den Einrichtungen des PTB und des französischen Nationalen Labors für Metrologie und Versuche LNE (in Zusammenarbeit mit CEA-LNHB) an im Rahmen des Projekts hergestellten Referenzprobensätzen nachgewiesen (Abbildung 4). Dabei konnte eine Übereinstimmung in der Grössenordnung von 20 % erreicht werden.

Kalibrierung tragbarer Aerosolmessgeräte

Tragbare, kommerziell verfügbare Messgeräte für Aerosolpartikelkonzentrationen in der Umgebungsluft sind wegen ihrer einfachen Handhabung und ihres günstigen Preises beliebt. Allerdings ist ihre Messgenauigkeit nicht vollständig bekannt und die Messgeräte liefern im Vergleich zu ausgefeilteren Geräten, wie sie im Labor eingesetzt werden, sehr instabile Signale. Im Rahmen des Projekts AEROMET II verglichen die Forschenden deshalb tragbare, kommerziell angebotene Messgeräte unter Laborbedingungen mit kalibrierten Referenzgeräten. Ausserdem führten sie Feldstudien unter verschiedensten Umweltbedingungen durch. In einem ersten Schritt konnten damit die Auswirkungen einer Vielzahl von Umweltbedingungen auf die Genauigkeit tragbarer, kommerziell angebotener Messgeräte quantifiziert werden. Darüber hinaus entwickelten die Forschenden für die tragbaren Messgeräte neuartige Verfahren mit Kompensationsalgorithmen, mit denen sich die Auswirkungen der Umweltbedingungen unter Anwendung der relevanten Messprinzipien berücksichtigen lassen.



Abbildung 2: Prüfaufbau für den Vergleich von Weich-Röntgen-Ladungskonditionierern am TROPOS

Bei Echtzeit-Online-Messungen von schwarzem Kohlenstoff (Black Carbon, BC) mit tragbaren optischen Messgeräten ergeben sich ähnliche Probleme mit der Qualität der Messungen wie bei den tragbaren Partikelzählern. Dies hängt mit unzureichenden Richtlinien und dem Fehlen rückführbarer Kalibrierungsmethoden zusammen. Da die betreffenden BC-Messinstrumente zurzeit nicht als Komponente von Luftgütemessstationen vorgeschrieben sind, werden auch keine regelmässigen Kalibrierungen durchgeführt. Im Rahmen von AEROMET II wurden nun tragbare Partikelzähler und BC-Messgeräte hinsichtlich ihrer wichtigsten relevanten Parameter wie Effizienz des Zählvorgangs, Genauigkeit und langfristiger Zuverlässigkeit unter Laborbedingungen und im Feld charakterisiert (Abbildung 5).

Ausblicke für die Aerosol-Metrologie

Am 27. Juni 2023 organisierten das *Laboratoire National Henri Becquerel (LNHB)*, das *Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN)* und die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Saclay (Frankreich) einen Workshop über die Zukunft der Aerosol-Metrologie. Im Rahmen der Beiträge wurden anstehende Entwicklungen vor dem Hintergrund der europaweit allgemein zurückgehenden Luftverschmutzung, neuer Regelungen und neuer Technologien erörtert.

Mohsen Kazemimanesh (National Physical Laboratory, NPL) ging auf synthetische Aerosole in der Umgebungsluft einschliesslich der Herausforderung ein, angesichts künftiger EU-Verordnungen Partikelgrössen < 10 nm oder zumindest < 30 nm zu messen. Ausserdem könnten gemäss Kazemimanesh Partikelmasse-Klassifizierer als In-situ-Bezugsmethode herangezogen werden, um die Partikelmassekonzentration zu messen. Dies, da die einzelnen Partikel in diesem Fall nur nach ihrer Masse und unabhängig von der Zusammensetzung klassifiziert werden.

David Butterfield (NPL) stellte optische Aerosolspektrometer als zugelassene Geräte vor und lieferte einen kurzen Überblick über Äquivalenzprüfungen im Vereinigten Königreich und in Deutschland. Mit Hilfe automatischer PM10- und PM2.5-Analysatoren wurden die Abweichungen aufgrund des Filtermaterials gegenüber gravimetrischen Methoden untersucht. Butterfield erläuterte, dass das Schwebstaub-Messverfahren TEOM-FDMS (Tapered Element Oscillating Microbalance) über städtische und länd-



Abbildung 3: ein neuer automatischer Pollenmonitor (links) neben einer Pollenfalle vom Typ Hirst (rechts im Hintergrund).

liche Netzwerke hinweg an rund 100 Standorten eingeführt wird und der Wechsel von massebasierten automatischen Messgeräten hin zu OPSS sich fortsetzt.

Amelle Kort (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, IRSN) fasste die neueste Forschung zu miniaturisierten Sensoren für die Aerosolmessung zusammen. Ausserdem betonte sie die Notwendigkeit industrieller In-situ-Einrichtungen für die Messung von Aerosolablagerungen ohne Veränderung der Ablagerungen selbst. Verschiedene Sensortypen sind hier gemäss Kort von Interesse: auf akustischen Wellen basierende Massesensoren wie SAW (Oberflächenwellenresonatoren), echtzeitfähige FBAR (Film Bulk Acoustic Resonator) sowie Resonanz-Massesensoren wie mikro- und nanoelektromechanische Systeme.

Kostas Eleftheriadis (National Centre for Scientific Research Demokritos) thematisierte die Herausforderungen im Bereich der Überwachung fester Ultrafeinstaubpartikel in der Umgebungsluft. Die WHO formulierte bereits gesundheitliche Bedenken hinsichtlich nicht regulierter BC-Massekonzentrationen und Konzentrationen von Ultrafeinstaubpartikeln (UFP). Zu den damit verbundenen Herausforderungen zählen gemäss Kostas Eleftheriadis die Entwicklung einer gründlichen Definition des Begriffs «festes Partikel» und entsprechender Verknüpfungen zu den Auswirkungen der jeweiligen Quellen und der Überwachung der Luftqualität. Offene Fragen betreffen dynamische UFP-Veränderungen nach Emissionen, die Verknüpfung gesundheitlicher Auswirkungen mit spezifischen Quellen sowie die Lücken in den Normen für Abgasmessungen und atmosphärische Überwachungsnetzwerke.

Thorsten Streibel (Universität Rostock) beschrieb die UL-TRHAS-Projekte (Ultrafeine Partikel aus dem Transportweissen – gesundheitliche Bewertung der Quellen). Gesundheit-

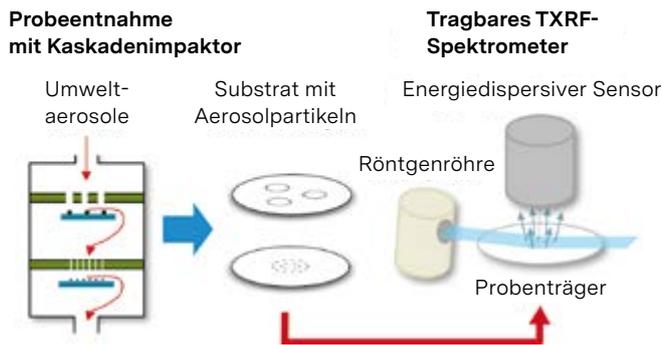


Abbildung 4: schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für tragbares TXRF-Spektrometer.

liche Auswirkungen von Aerosolen können von unterschiedlichen Transportmodi, verschiedenen Kraftstoffen, Nicht-Auspuff-Emissionen und atmosphärischen Alterungsprozessen abhängig sein. Auch die chemische Zusammensetzung und sekundäre Aerosole spielen eine Rolle. Thorsten Streibel betonte, dass sich die Risikobewertung durch die Kenntnis der Gesundheitsgefahren verschiedener Quellen verbessern liesse. Toxizitätstreiber müssten identifiziert werden und atmosphärische Alterungseffekte könnten die Partikelanzahl-Grössenverteilung signifikant verändern.

Thomas Krinke (TSI GmbH) berichtete über Herausforderungen für die Aerosol-Metrologie aus Sicht der Hersteller und Anwendungen. Er lieferte einen Überblick über Echtzeitmessungen von Submikrometer-Partikeln und betonte den Bedarf an Mobilitätsanalysator-Messungen von Partikeln unter 10 nm. Anschliessend ging er auf Vorschläge ein, einen Elektro spray-Tröpfchengenerator für die Verteilung von Bezugspartikeln aus Lösungen sowie wasserbasierte Kondensationspartikelzähler (CPC) für Partikel über 2 µm einzusetzen.

Drew Hill und Jeff Blair (AETHLABS) stellten Fortschritte bei der Black-Carbon-Messung und der Quellenzuordnung mit dem miniaturisierten microAeth®-Gerät vor. Anwendungsbereiche liegen gemäss Hill und Blair in der grossflächigen und tragbaren Aethalometrie. MicroAeth-Messgeräte werden für die mobile Messung von Umgebungskonzentrationen und Expositionen eingesetzt. Wegen ihrer hohen Variabilität kann die Analyse der räumlichen Russverteilung besonders wichtig sein. Mithilfe mobiler Überwachung können Verschmutzungs-Hotspots einfacher räumlich identifiziert werden, beispielsweise durch Vergleich der Schadstoffkonzentrationen in der Umgebung einer Strasse und auf der Strasse selbst.

Danksagung und Quellenangaben

Diese Arbeiten waren Teil des Projekts EMPIR 19ENV08 AEROMET II. Das Projekt wurde durch das EMPIR-Programm gefördert und durch die teilnehmenden Länder sowie das Forschungs- und Innovationsprogramm Horizon 2020 der Europäischen Union mitfinanziert. ●

Quellen

Bescond, A., Oster, C., Fiscaro, P., Goddard, S., Quincey, P., Tsakanika, L.-A., Lympelopoulou, T., Ochsenkuehn-Petropoulou, M. (2021) Atmosphere 12, 67

Seeger, S., Osan, J., Czömpöly, O., Gross, A., Stosnach, H., Stabile, L., Ochsenkuehn-Petropoulou, M., Tsakanika, L.A., Lympelopoulou, T., Goddard, S., Fiebig, M., Gaie-Levrel, F., Kayser, Y., Beckhoff, B. (2021) Atmosphere 12, 309

Vasilatou, K., Walchli, C., Koust, S., Horender, S., Lida, K., Sakurai, H., Schneider, F., Spielvogel, J., Wu, T. Y., Auderset, K. (2021) J. Aerosol Science 157, 105818

Vasilatou, K., Walchli, C., Lida, K., Horender, S., Tritscher, T., Hammer, T., Rissler, J., Gaie-Levrel, F., Auderset, K. (2022) J. Aerosol Science, <https://doi.org/10.1080/02786826.2022.2139659>

Czömpöly, O., Börcsök, E., Groma, V., Pollastri, S., Osán, J. (2021) Atmospheric Pollution Research 12, 101214

Lieberherr, G., Auderset, K., Calpini, B., Clot, B., Crouzy, B., Gysel-Beer, M., Konzelmann, T., Manzano, J., Mihajlovic, A., Moallemi, A., O'Connor, D., Sikoparija, B., Sauvageat, E., Tummon, F., Vasilatou, K. (2021) Atmos. Meas. Tech. 14, 7693–7706

Kayser, Y., Osán, J., Hönicke, P. and Beckhoff B. (2022) Analytica Chimica Acta 1192, 339367

Ziel des Projekts

Das Gesamtziel des Projekts EMPIR AEROMET II besteht in der rückverfolgbaren Messung und der Charakterisierung von Aerosolen in der Umwelt. Das METAS hat an mehreren, erfolgreichen Teilprojekten mitgewirkt.



Abbildung 5: Versuchsaufbau für die Kalibrierung tragbarer optischer Partikelgrössenspektrometer.

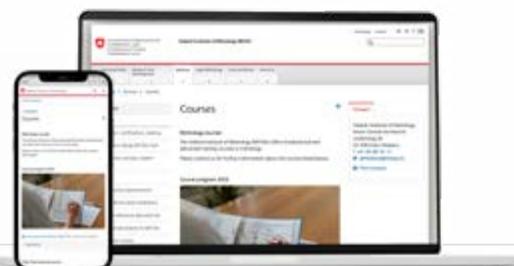
Bereit für neues Wissen?



Tätigkeitsbericht



Die Referenz.



www.metas.ch>Dienstleistungen>Kurse



Nutzen Sie kompaktes Wissen angenehm präsentiert: **Die Referenz.** – das Schweizer Fachmagazin für Metrologie – informiert Sie zweimal jährlich über Forschungsprojekte, Anwendungen und Entwicklungen in der Metrologie.

Bildung am METAS: Unsere Basis- und Weiterbildungskurse sowie Lehrgänge für Fachpersonen finden Sie kompakt zusammengefasst auf unserer Website.