

Die Referenz.

Das Schweizer Metrologiemagazin

Nr. 01 | 2026

[Seite 7 →](#)

**Realisierung und Weitergabe
der Längeneinheit**

[Seite 16 →](#)

**Auf der Spur
der PFAS
in Lebensmitteln
und im Blut**

[Seite 25 →](#)

**Neues Primärnormal
zur Durchflusskalibrierung
mit Wasserstoff**



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

Sören Fricke
Hugo Lehmann
Lena Märki
Markus Zeier

Sprachversionen

DE, FR, EN (online)

Bildnachweis

METAS, emte.ch (S. 13)

Gestaltung

Casalini Werbeagentur AG
casalini.ch

Copyright

© 2026
Eidgenössisches Institut für Metrologie METAS, Bern
Der Nachdruck von Artikeln ist mit Quellenangabe
gestattet. Bitte schicken Sie ein Belegexemplar an
die Redaktionsadresse.

Auflage

2700 Exemplare deutsch
1100 Exemplare französisch
Englisch online

Druck

Galledia AG, Flawil
galledia.ch

Administration

ISSN 2813-8961 (Print deutsch)
ISSN 2813-897X (online deutsch)

Titelseite

Kalibrierung eines ZEISS METROTOM nano®
Prüfkörpers zur Genauigkeitsüberwachung
von CT-Systemen auf der METAS microCMM.

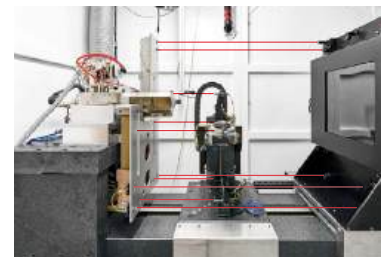
Inhalt

4 Präzision in der Dimension – das Labor Länge, Nano- und Mikrotechnik bei METAS



7 Realisierung und Weitergabe der Längeneinheit

10 METAS-CT: Metrologische Computertomografie mit Sub-Mikrometer-Präzision



Editorial

Liebe Leserin, lieber Leser

Präzision ist die Grundlage von Vergleichbarkeit und Vertrauen – im Labor ebenso wie im täglichen Leben. Metrologie wirkt meist im Hintergrund und ermöglicht Verlässlichkeit, heute wie in Zukunft. Diese Ausgabe unserer Zeitschrift zeigt, wie breit und zugleich tief diese Wirkung ist – von der Realisierung fundamentaler Einheiten über hochauflösende Messtechnik bis hin zu analytischen Fragestellungen mit hoher gesellschaftlicher Relevanz.

Einen Schwerpunkt bilden Beiträge aus der Längenmetrologie sowie der Nano- und Mikrotechnik. Sie geben Einblick in die Realisierung und die Weitergabe der Längeneinheit und zeigen anhand der metrologischen Computertomografie mit Sub-Mikrometer-Präzision, wie Rückführbarkeit und technologische Innovation zusammenwirken.

Ein weiterer Fokus liegt auf per- und polyfluorierten Alkylverbindungen (PFAS). Die Artikel zur Spu-

renanalyse in Blut und Lebensmitteln sowie zur Harmonisierung analytischer Verfahren verdeutlichen die zentrale Rolle verlässlicher Messungen für Umwelt- und Gesundheitsschutz sowie für regulatorische Entscheidungen.

Mit dem neuen Primärnormal zur Durchflusskalibrierung mit Wasserstoff wird ein zukunftsweisendes Thema aufgegriffen.

Einen bewusst spielerischen Akzent setzt der Beitrag zur Zukunft der Metrologie: Mithilfe von KI-Tools generierte Antworten eröffnen ungewohnte Perspektiven – und laden dazu ein, darüber nachzudenken, wie Metrologie auch künftig Vertrauen im Alltag schafft.

Wir wünschen Ihnen eine anregende Lektüre.

Dr. Fabiano Assi

Vizedirektor

Eidgenössisches Institut für Metrologie METAS

14 In Kürze

16 Auf der Spur von PFAS in Lebensmitteln und Blut



19 Objekt



20 PFAS: Harmonisierung und Verbesserung der Analyse dieser Ewigkeitschemikalien



25 Neues Primärnormal zur Durchflusskalibrierung mit Wasserstoff



28 Über die Zukunft der Metrologie





Über das METAS

Präzision in der Dimension – das Labor Länge, Nano- und Mikrotechnik beim METAS

Das Labor für Länge, Nano- und Mikrotechnik am METAS sichert die SI-Rückführung des Meters in der Schweiz. Mit eigens entwickelten Messplätzen wie METAS-CT und μ -CMM setzt es weltweit Massstäbe in Präzision und unterstützt Industrie und Forschung.

Philippe Chavanne

Das Labor für Länge, Nano- und Mikrotechnik (LNM) des Eidgenössischen Instituts für Metrologie METAS ist das nationale Kompetenzzentrum für dimensionelle Metrologie. Es realisiert und verbreitet die SI-Einheit «Meter» in der Schweiz und stellt sicher, dass Längenmessungen in Industrie, Forschung und amtlicher Kontrolle auf höchstem Genauigkeitsniveau erfolgen.

Das Labor umfasst ein engagiertes Team von zehn Spezialisten, das nicht nur Kalibrierungen und Prüfungen durchführt, sondern auch aktiv an der Weiterentwicklung der Messtechnik arbeitet. Im Durchschnitt betreut das Team drei laufende Forschungs- und Entwicklungsprojekte in enger Zusammenarbeit mit Industriepartnern und veröffentlicht jährlich bis zu fünf wissenschaftliche Publikationen. Damit trägt das Labor entscheidend zur Innovation und zur internationalen Vernetzung im Bereich der Metrologie bei.

Mit neun klimatisierten, vibrationsarmen Laboren – darunter Reinräume der ISO-Klassen 7 und 3 – und 32 hochpräzisen Messstationen bietet das Labor eine Infrastruktur, die weltweit ihresgleichen sucht.

Die Rückführung aller Messungen auf nationale Normale und die internationale Anerkennung durch die BIPM garantieren höchste Zuverlässigkeit.

Neben der Kalibrierung von Messgeräten und Normalen entwickelt das Labor neue Messverfahren, führt Typprüfungen durch und unterstützt die Indus-



Daniel Schneeberger an der Bedienung der Masken-Messmaschine welche sich in der im Hintergrund ersichtlichen ISO Klasse 3 Reinraumkabine befindet.



Abbildung 1: Alleinstellungsmerkmale des Labors Länge, Nano- und Mikrotechnologie: Know-how \times Infrastruktur \times Präzision.

trie bei komplexen Messaufgaben. Mit über 2000 ausgestellten Kalibrierzertifikaten pro Jahr und 83 CMC-Einträgen in der internationalen BIPM-MRA-KC-Datenbank ist das Labor ein unverzichtbarer Partner für Präzision in der Schweiz.

Unsere fünf Kompetenzfelder

Die Arbeit des LNM-Labors gliedert sich in fünf zentrale Kompetenzfelder, die den gesamten Bereich der dimensional Metrologie abdecken:

1 Länge – Präzision in der Basis

Das Labor realisiert die SI-Einheit «Meter» (siehe nachfolgender Artikel) und bietet Kalibrierungen für Endmasse, Massstäbe und komplexe Längenmesssysteme. Die Infrastruktur umfasst u.a. eine 50-m-Messbank für Massstäbe und Laser-Distanzgeräte sowie interferometrische Systeme für höchste Genauigkeit bei der Kalibrierung von Endmassen und Durchmessern unterschiedlicher Arten.

2 Form – geometrische Genauigkeit

Kalibrierung von Rundheit, Geradheit, Ebenheit und Zylindrizität für Präzisionsteile. Eigens weiterentwickelte Messmaschinen wie Talyrond 73 und Rondcom 65B ermöglichen Unsicherheiten im Nanometerbereich.

3 Multidimensionale Metrologie – das Herzstück des Labors

Einzigartige Messsysteme, die grösstenteils in Eigenentwicklung entstanden sind, bilden das Aushängeschild des Labors und bieten der Industrie Messgenauigkeiten an der Spitze der internationalen Metrologie. Hier werden komplexe 2D- und 3D-Geometrien mit höchster Präzision erfasst – von Mikrobauteilen aus der Uhren- und der Pharmaindustrie bis hin zu kompletten Baugruppen aus dem AeroSpace-Sektor.

Unsere Kerntechnologien:

Mikro-Koordinatenmessgerät (μ -CMM)

- Eigenentwicklung für taktile 3D-Messungen im Nanometerbereich.
- Messvolumen: $90 \times 90 \times 38\text{ mm}^3$, Antastkraft: $< 5\text{ mN}$, Wiederholbarkeit: 5 nm .
- Messunsicherheit: bis zu $27\text{ nm} + 2 \cdot 10^{-7}\text{ L}$ (unidirektional).
- Unterstützt Einzelpunktantastung und Freiformscanning für komplexe Mikrogeometrien.

Photomasken-Messmaschine

- Optisches 2D-Koordinatenmessgerät für Strukturen auf Photomasken und Glasmassstäben.
- Messbereich: $400 \times 300\text{ mm}$, Unsicherheit: 16 nm , $0.08 \cdot 10^{-6}\text{ L}$ (Zerodur und Quarz).
- Reinraumklasse ISO 3, Temperaturstabilität $\pm 0.02\text{ }^\circ\text{C}$ für höchste Präzision.



Metrologische Computertomografie (METAS-CT)

- Wird im Artikel «METAS-CT: Metrologische Computertomografie mit Sub-Mikrometer-Präzision» vorgestellt.

Atomic Force Microscope (AFM)

- Für hochpräzise Oberflächenmessungen im Nanometerbereich.
- Messbereich: 50 × 50 × 12 µm, Unsicherheit für Stufenhöhen und Partikelgrößen im Bereich weniger Nanometer.
- Ideal für 1D- und 2D-Strukturabstände, Stufenhöhen und Partikelgrößen (z.B. Polymer, Silica, Metall).

Ausblick in die Zukunft

Das Labor für Länge, Nano- und Mikrotechnik bleibt nicht stehen – im Gegenteil: Als nächster Meilenstein steht die Kommissionierung des eigens entwickelten metrologischen 3D-AFM (Atomic-Force-Mikroskops) bevor. Dieses hochinnovative System kombiniert die Vorteile der Rasterkraftmikroskopie mit einer interferometrischen Überwachung in allen drei Achsen und wird neue Massstäbe in der präzisen Oberflächen- und Nanostrukturmessung setzen. Damit erweitert das METAS seine führende Rolle in der multidimensionalen Metrologie und schafft die Grundlage für zukünftige Anwendungen im Bereich von Batterieentwicklung, Life Sciences und Halbleiterindustrie. ●

4 Oberflächen – Qualität der Funktionsflächen

Kalibrierung von Linienprofilen von Rauheits-, Welligkeits- und Konturnormalen sowie Schneidkantenradien mittels des Tastschnittgerätes MarSurf LD 130. Zurzeit wird die Messdatenauswertung vollständig auf ISO 21920 erweitert.

5 Winkel – Präzision in der Drehung

Kalibrierung von optischen Polygonen, Winkelendmassen und Autokollimatoren. Luftgelagerte Winkelmesstische und Sinuslineale ermöglichen Genauigkeiten bis zu 0.001”.

Warum ist Längenmetrologie heute wichtiger denn je?

In einer Welt, in der Präzision über Qualität, Sicherheit und Innovation entscheidet, ist die exakte Bestimmung von geometrischen Grössen unverzichtbar. Ob in der Halbleiterindustrie, im Maschinenbau oder in der Medizintechnik – die Anforderungen an Genauigkeit steigen stetig, getrieben durch zunehmende Miniaturisierung, höhere Integrationsdichten und wachsende Anforderungen an Systemverfügbarkeit und Prozessstabilität. Das Labor Länge des METAS stellt sicher, dass die Schweiz in diesem Bereich weltweit führend bleibt.



Kundenstimme: Martin Wiederkehr, Leiter Kalibrierstelle, Saphirwerk AG

«Die Zusammenarbeit mit dem Labor Länge, Nano- und Mikrotechnik vom METAS überzeugt uns seit Jahren. Die kurzen Lieferzeiten, die extrem niedrigen Messunsicherheiten und die hohe Fachkompetenz bei Kalibrierdienstleistungen sind für uns entscheidend. Das METAS ist für uns ein verlässlicher Partner, wenn es um Präzision auf höchstem Niveau geht.»



Metrologie allgemein

Realisierung und Weitergabe der Längeneinheit

Die Realisierung des Meters am METAS basiert auf hochstabilen Helium-Neon-Lasern, die gemäss der *Mise en pratique* exakt auf einen atomaren Jodübergang abgestimmt sind. Über die Kalibrierung von Laserinterferometern stellt das METAS eine international rückgeführte, verlässliche Kalibrierkette sicher.

Dr. Kurt Gunderson, Philippe Chavanne

Meterdefinition

Der Meter ist definiert als die Länge der Strecke, die Licht im Vakuum innerhalb einer Zeitspanne von $1/299\,792\,458$ Sekunden zurücklegt. Damit ist die Längeneinheit unmittelbar an eine fundamentale Naturkonstante, die Lichtgeschwindigkeit, gekoppelt.

Realisierung der Längeneinheit

Am METAS wird diese Definition durch den Einsatz von Lasern mit bekannter und ausserordentlich stabiler Frequenz realisiert. Als Primärnormale kommen drei Helium-Neon-Laser zum Einsatz, deren optische Frequenz auf einen atomaren Übergang abgestimmt ist, genauer auf eine Absorptionslinie des Jodgases. Diese Laser dienen als besonders stabile und reproduzierbare optische Referenzen und eignen sich für den kontinuierlichen Betrieb und die langfristige Sicherstellung der Längeneinheit (Abbildung 1).

Mithilfe eines faseroptischen Frequenzkamms werden die optischen Frequenzen dieser Laser direkt mit der Realisierung der Sekunde verknüpft. Auf diese Weise wird eine unmittelbare Rückführung der Längeneinheit auf die Zeit erreicht. Die relative Unsicherheit der Meterrealisierung mit jodstabilisierten Helium-Neon-Lasern beträgt $2,5 \times 10^{-11}$.

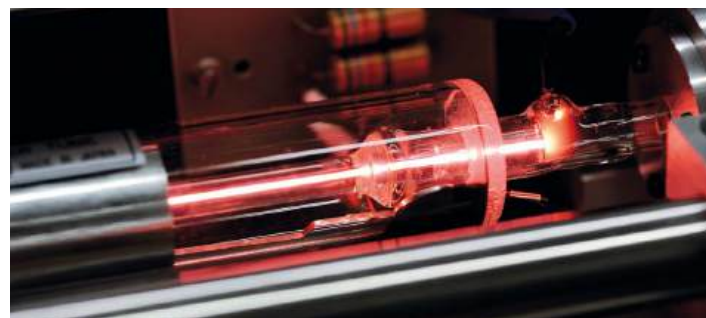


Abbildung 1: Aufbau eines jodstabilisierten Helium-Neon-Lasers, der für die primäre Realisierung des Meters am METAS verwendet wird.

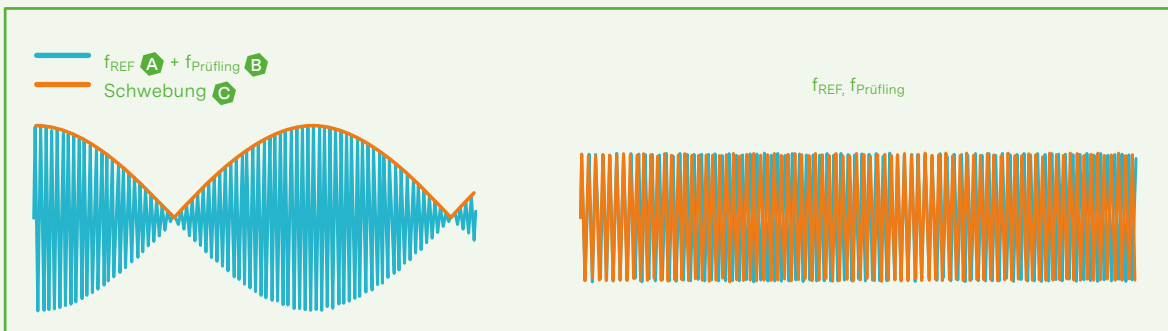
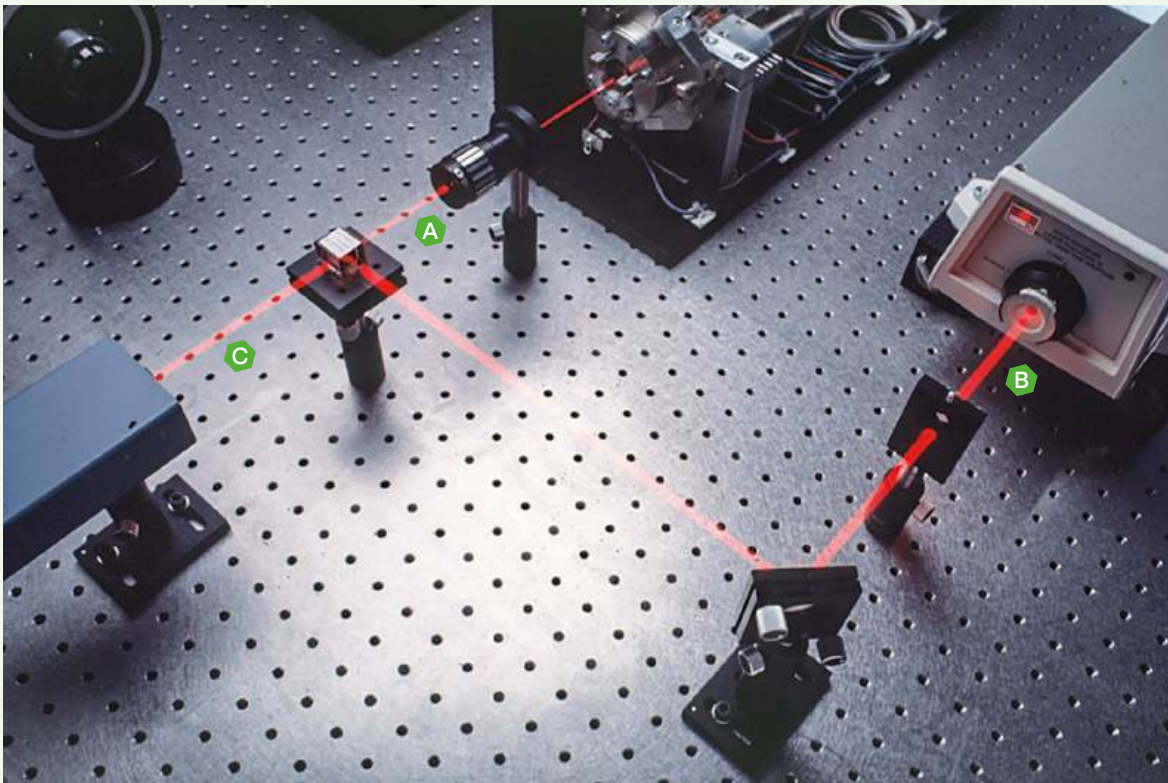


Abbildung 2: Durchführung einer Laserkalibrierung mittels einer heterodynen Messstrategie, bei der der Strahl des zu kalibrierenden Lasers **B** mit demjenigen von der Meter primär Realisierung **A** überlagert wird. Die daraus resultierende Schwebung **C** entspricht der zu kalibrierenden Frequenzdifferenz.

(*Mise en pratique*¹), was – anschaulich formuliert – einer Längenunsicherheit von etwa 1 mm bezogen auf den Erdumfang entspricht.

Weitergabe der Längeneinheit

Die präzise bekannten Wellenlängen stabilisierter Laser – z.B. 0.633 μm im Falle des roten Helium-Neon-Lasers – bilden einen «materielosen Massstab» für die Längenmesstechnik. Sie ermöglichen den direkten Vergleich gemessener Dimensionen mit der realisierten Einheit.

In interferometrischen Messsystemen werden die Wellenlängen des Laserlichts entlang einer abgefahrenen Wegstrecke über einer Massverkörperung gezählt und interpoliert. Dieses Messprinzip erlaubt einen aussergewöhnlich grossen theoretischen Messbereich, der von mehreren Dutzend Metern bis in den Subnanometerbereich reicht. In der praktischen Anwendung begrenzt der Brechungsindex von Luft jedoch die erreichbare Genauigkeit auf einige Dutzend Nanometer, wodurch Messungen im Subnanometerbereich sich im ultrahohen Vakuum realisieren lassen.

Voraussetzung für die präzise Umrechnung der erfassten Interferenzsignale in eine eindeutig bestimmte Länge ist eine exakt bekannte und stabile Laserwellenlänge.

Kalibrierung von Laserinterferometern

Am Anfang jeder Kalibrierkette in der Längenmesstechnik steht die Kalibrierung der Laserinterferometer. Die optischen Frequenzen eines Helium-Neon-Lasers liegen mit rund 474 THz weit über dem direkt erfassbaren Bereich herkömmlicher Elektronik. Solch hohe Frequenzen können daher nicht direkt mit elektronischen Messgeräten erfasst werden. Aus diesem Grund wird, wie in Abbildung 2 gezeigt, eine Heterodyn-Messstrategie angewendet, bei der der Strahl des zu kalibrierenden Lasers mit demjenigen des Primärnormals – eines jodstabilisierten Lasers – überlagert wird.

Die dabei entstehende Schwebung entspricht der Frequenzdifferenz der beiden optischen Signale. Es entsteht ein niederfrequentes Signal, das die Differenz der beiden sehr hohen Laserfrequenzen widerspiegelt. Da diese Differenz typischerweise unter 1 GHz liegt, kann sie nach opto-elektronischer Detektion direkt gemessen werden.

Die Kalibrierung von Laserinterferometern am METAS umfasst jedoch nicht nur die Bestimmung der optischen Frequenz, sondern auch die Kalibrierung der Brechzahlindex-Kompensationseinheiten, die Umwelteinflüsse wie Luftdruck, Temperatur und Feuchte berücksichtigen und damit die Änderung der Laserwellenlänge in Luft gegenüber der stabilen Vakuumwellenlänge korrigieren. ●

XRCD-Methode: Silizium-Kristallstruktur als alternative Primärrealisation des Meters

Neben der klassischen optischen Interferometrie existiert eine alternative Primärrealisation des Meters, die auf der atomaren Struktur von Silizium basiert.

- **Messprinzip:** Bestimmung der Gitterkonstante $\text{Si}\{220\}$ eines hochreinen Siliziumkristalls mittels Röntgeninterferometrie.
- **Ableitung des Meters:** Die Länge wird über die Anzahl der Gitterebenen auf einer definierten Strecke bestimmt.
- **Unabhängigkeit:** Funktioniert ohne optische Interferometrie oder Time-of-Flight-Messungen.
- **Anwendungsbereich:** Hochpräzise Längensmetrologie und Fundamentalanalysen, z. B. in der Bestimmung der Avogadro-Konstanten.
- **Charakter:** Gilt als alternative **Primärrealisation**, da sie direkt auf fundamentalen physikalischen Strukturen basiert (*Bureau International des Poids et Mesures, 2019*).

Link

- 1 Bureau International des Poids et Mesures (2019). SI Brochure – 9th edition: Appendix 2 – *Mise en pratique* for the definition of the metre in the SI. Retrieved from <https://www.bipm.org/documents/20126/41489670/SI-App2-metre.pdf>

Dienstleistung

METAS-CT: Metrologische Computertomografie mit Sub-Mikrometer-Präzision

Das in-house entwickelte METAS-CT setzt neue Standards in der SI-rückführbaren Computertomografie. Neue Korrekturen für Temperatur, Strahlaufhärtung und Fokusverschiebungen reduzieren die Messunsicherheit und ermöglichen deutlich zuverlässigere Ergebnisse.

Dr. Alain Küng, Marc Trösch, Philippe Chavanne

Das METAS-CT im Überblick

Das METAS-CT ist kein konventionelles Computertomografiesystem, sondern ein hochpräzises metrologisches Messinstrument, das vom Labor Länge speziell für die Anforderungen der modernen Mikro- und Nanotechnologie entwickelt wurde. Im Zentrum des Systems steht eine Sub-Mikrofokus-Röntgenröhre mit einer effektiven Spotgrösse von etwa einem Mikrometer, kombiniert mit einem grossformatigen Flachdetektor mit 4096×4096 Pixeln. Diese Systemkonfiguration ermöglicht die dreidimensionale Erfassung selbst kleinster Werkstücke im Millimeter- und Submillimeterbereich mit einer Auflösung und Messgenauigkeit, die bisher vorwiegend taktilen Koordinatenmessgeräten vorbehalten war.

Doch die Hardware allein genügt nicht: Die metrologische Rückführbarkeit wird durch ein In-situ-Geometriemesssystem sichergestellt. Acht Faserinterferometer, fünf optische Geradheitssensoren und drei Indexsensoren überwachen die relative Lage von Quelle, Drehtisch und Detektor während jeder einzelnen Aufnahme. Auf diese Weise wird die Projektionsgeometrie für jede einzelne Radiografie bestimmt und direkt in die Rekonstruktion eingebunden. Ergänzt wird das System durch ein präzise ausgelegtes Temperaturmanagement mit mehreren Kühlkreisläufen sowie einem Netz von Temperatursensoren, das thermische Driften erfasst und kompensiert. Das Ergebnis sind eine hohe Langzeitstabilität über viele Stunden hinweg sowie eine Messgenauigkeit, die in Vergleichsmessungen mit Mehrkugel-Normale im Submikrometerbereich liegt.

Jüngste Entwicklungen:

von der Theorie zur Praxis

Die letzten Jahre waren geprägt von intensiver Forschung und Entwicklung mit dem Ziel, die CT-Technologie für die dimensionelle Messtechnik auf ein neues Niveau zu heben. Ein Meilenstein ist die erweiterte In-situ-Geometriekompensation. Während klassische CT-Systeme von einer statischen Projektionsgeometrie ausgehen, berücksichtigt das METAS-CT dynamische Veränderungen wie thermische Driften oder minimale Bewegungsabweichungen während der Messung. Für jede Projektion wird die tatsächliche Geometrie des Computertomografen erfasst und direkt in die Rekonstruktion eingebunden.

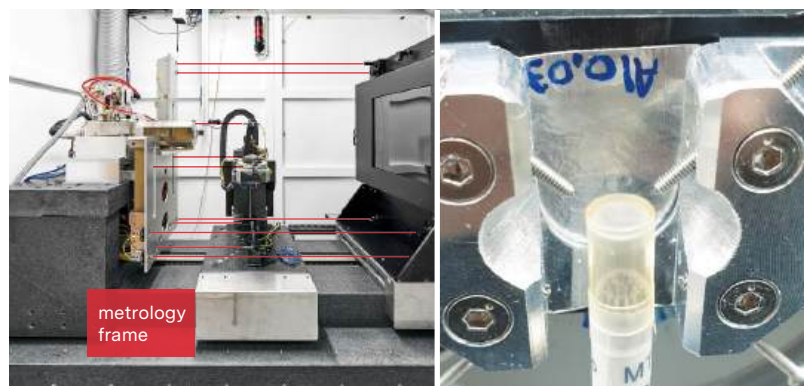


Abbildung 1: Ansicht des METAS-CT sowie eine vergrösserte Darstellung der Referenzkugeln, die während des Scans eines Artefakts am Röhrenende zur Kompensation der Fokuspunktdrift befestigt sind.

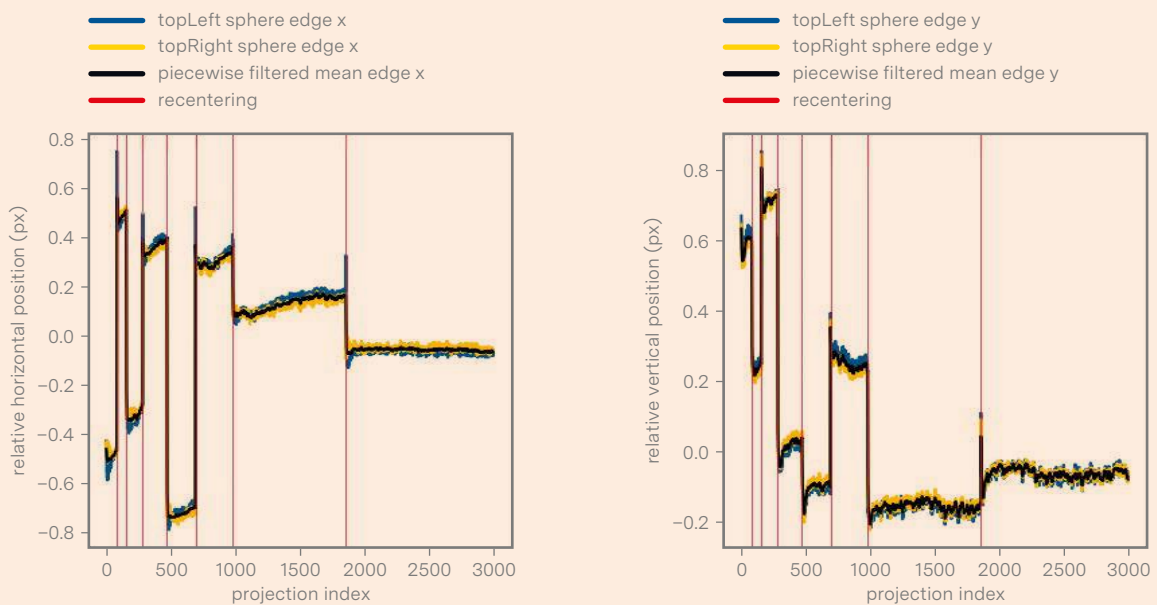


Abbildung 2: Drift der Referenzkugeln und Neuzentrierung des Fokuspunkts während eines Scans unseres Kalibrierartefakts.

Bei den jüngsten Entwicklungen lag ein besonderer Fokus auf der exakten Charakterisierung der Detektorgeometrie sowie der Korrektur der Fokuspunktdrift. Denn während ein Flachdetektor theoretisch eine plane Fläche mit perfekt regelmässigen Pixeln darstellt, ist dies in der Praxis nicht der Fall. Das METAS hat ein Verfahren entwickelt, das geometrische Abweichungen für jedes Pixel erfasst und korrigiert. Auch der Fokuspunkt der Röntgenröhre verändert sich während der Messung durch thermische Effekte. Zwei Referenzkugeln in den oberen Bildecken (Abbildung 1, rechts) erlauben es, diese Positionsänderungen in Echtzeit nachzuverfolgen und für jede Projektionsaufnahme zu korrigieren (Abbildung 2). Das Ergebnis ist eine signifikante Reduktion der Messunsicherheit bei der geometrischen Auswertung von Scandaten.

Ein weiteres zentrales Thema der Computertomografie sind Rekonstruktionsartefakte, die unter anderem durch die Kegelstrahlgeometrie verursacht wurden. Das METAS-CT adressiert diese Effekte durch den Einsatz von zusätzlichen Scantrajektorien. Neben der klassischen Kreisbahn kommen vertikale Linienfahrten zum Einsatz, die in Kombination mit fortschrittlichen Rekonstruktionsalgorithmen, wie TIGRE, zu einer deutlichen Reduktion typischer Verzerrungen beitragen.

Schliesslich ist die Strahlaufhärtung ein zentrales Thema. Sie führt zu systematischen Messabweichungen,

weil das Röntgenspektrum beim Durchdringen des Materials verändert wird. Das METAS hat eine innovative Methode entwickelt, die auf der Analyse des Bildrauschens basiert. Aus der statistischen Verteilung der Grauwertschwankungen (Abbildung 4) wird die notwendige Korrektur abgeleitet – eine elegante Lösung, die ohne aufwendige Materialdaten auskommt. Abbildung 3 zeigt, wie sich Beam-Hardening-Artefakte, insbesondere bei starken Kontrastübergängen zwischen unterschiedlichen Werkstoffen, deutlich reduzieren lassen.

Diese Entwicklungen machen deutlich: Das METAS-CT ist nicht nur ein Gerät, sondern ein umfassendes Konzept, das Hardware, Software und Metrologie vereint. Durch die kontinuierliche Überwachung und Kompensation aller relevanten Einflussgrössen ermöglicht es eine signifikant reduzierte Messunsicherheit bei der Vermessung von Prüfkörpern – und definiert damit die Grenzen der metrologischen Computertomografie neu.

Use Case: Gewindeanalyse neu gedacht

Gewinde sind unscheinbare Helices, doch ihre Geometrie entscheidet über die Funktion ganzer Baugruppen. Ein korrektes Zusammenspiel von Schraube und Mutter hängt nicht nur vom Durchmesser ab, sondern ebenso von Flankenwinkel, Steigung und Formtreue. Hier beginnt die Geschichte unseres Vergleichs von der klassischen Drei-Draht-Methode und der modernen CT-Analyse.

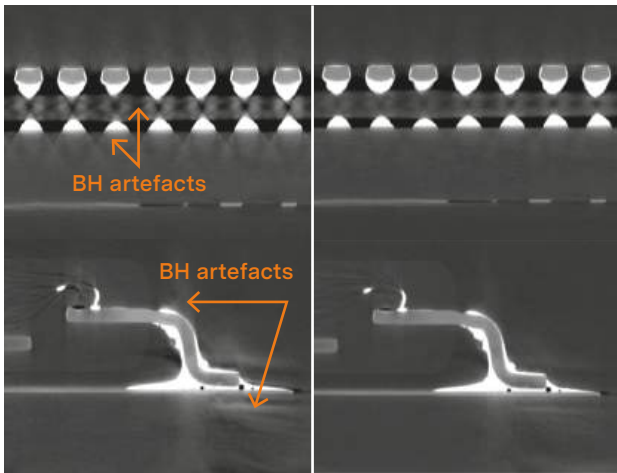


Abbildung 3: Einzelprojektion eines USB-Sticks; rechts mit Pixel-Beam-Hardening-Korrekturen und links ohne Korrektur.

Die Drei-Draht-Methode ist seit Jahrzehnten ein weitverbreitetes Messverfahren zur Bestimmung des einfachen Flankendurchmessers. Drei präzise Drähte werden in die Gewindeflanken eingelegt, das Mass «über Drähte» wird ermittelt, und daraus wird der Flankendurchmesser berechnet – unter Annahme der Nominalwerte für Steigung und Flankenwinkel (Abbildung 5 links). Das Verfahren ist robust und liefert beeindruckende Genauigkeiten, so wurde im direkten Vergleich für eine Gewindelehre NIHS S0.9 ein Wert von 0.7586 mm mit einer erweiterten Messunsicherheit von nur 1.2 µm bestimmt. Bei der Messung des «echten» Flankendurchmessers erfolgt die Bestimmung von Steigung und Flankenwinkel entweder mit drei unterschiedlich grossen Drähten, die eine höhere Messunsicherheit aufweisen, oder mit einem Gewindescanner.

Doch diese Präzision hat Grenzen. Die Methode misst an einer definierten Stelle, unter idealen Bedingungen. Sie sagt nichts über lokale Abweichungen, asymmetrische Flanken oder Steigungsfehler entlang der Helix. Hinzu kommt, dass die Methode für Innengewinde aufgrund der Zugänglichkeit nicht geeignet ist. Heutige Gewindescanner können sowohl Aussen- wie auch Innengewinde messen, sie kommen jedoch bei Gewinden unter M1 an ihre Grenzen.

Hier setzt die Computertomografie an – und erweitert die Perspektive. Statt punktueller Information liefert sie ein vollständiges Volumenmodell. Nach dem Scan, der dank Geometrie- und Artefaktkorrekturen höchste Genauigkeit erreicht, wird die

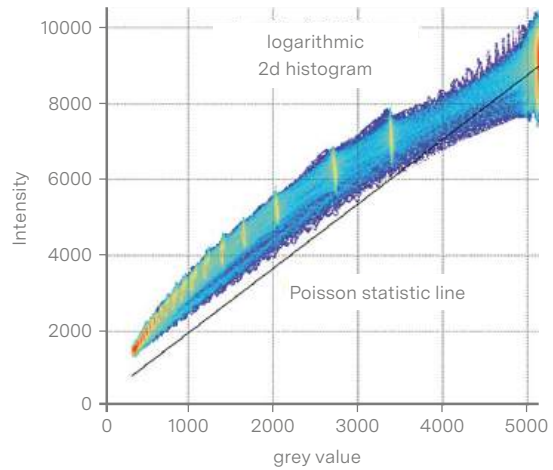


Abbildung 4: Bildrauschen als Funktion der Graustufenwerte eines Stufenkeilstandards.

Oberfläche extrahiert. Darauf aufbauend beginnt die eigentliche Analyse: Helikale Fits entlang der Profilverflanken bestimmen die Steigung, axiale Schnitte liefern den Flankendurchmesser, und Profilanalysen über den gesamten Umfang ermöglichen die Bestimmung des Flankenwinkels – einschliesslich kleinster Asymmetrien (Abbildung 5 rechts).

Der Mehrwert liegt darin, dass die CT nicht nur die Sollmasse erfasst, sondern die reale Geometrie mit ihren Abweichungen. Gratbildung, Rattermarken, Poren oder Materialeinschlüsse werden sichtbar, auch in verdeckten Bereichen. Für die Qualitätssicherung bedeutet dies, dass potenzielle Probleme frühzeitig erkannt werden, bevor sie zu Funktionsstörungen führen.

Ein typisches Beispiel ist eine Schraube, die in der Gewindeführung schwergängig läuft, obwohl der Flankendurchmesser gemäss Drei-Draht-Messung innerhalb der Toleranz liegt. Ein CT-Scan zeigt in diesem Fall die Ursache, etwa minimale Schwankungen im Flankenwinkel oder periodische Steigungsabweichung infolge von Werkzeugschwingungen. Solche Effekte sind insbesondere bei kleinen Gewinden mit klassischen Messmethoden nur eingeschränkt erfassbar – und genau hier liegt die Stärke des METAS-CT.

Fazit: Die Drei-Draht-Methode bleibt ein unverzichtbarer Standard für die Kalibrierung von Gewinden. Für eine umfassende geometrische Charakterisierung, die über den Flankendurchmesser hinausgeht, bietet die Computertomografie jedoch entschei-

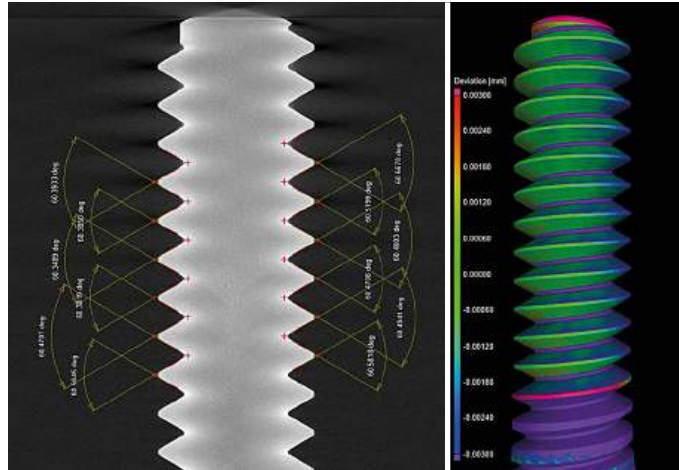
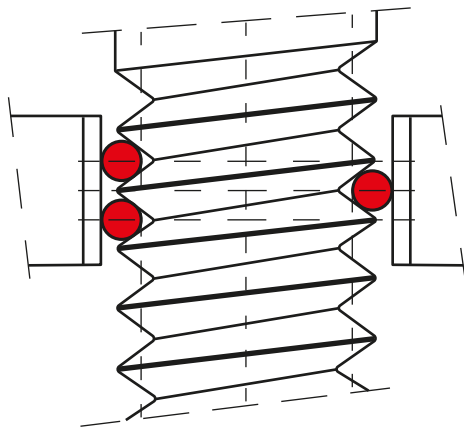


Abbildung 5: Klassische 3-Draht-Gewindemessung (links) und Charakterisierung mittels CT (rechts).

dende Vorteile. Mit METAS-CT und den jüngsten Entwicklungen wird eine vollständige, rückführbare Analyse von Gewinden – einschliesslich Flankenwinkel und Steigung – im Mikrometerbereich möglich. Dies stellt nicht nur einen technologischen Fortschritt dar, sondern markiert einen Paradigmenwechsel in der industriellen Messtechnik von insbesondere Kleinstgewinden. ●

Literatur

- Bircher B.A. et al. (2020): METAS-CT: Metrological X-ray computed tomography at sub-micrometre precision, euspen Conference.
- Lüthi M. et al. (2020): X-ray flat-panel detector geometry correction to improve dimensional computed tomography measurements, Meas. Sci. Technol.
- Bircher B.A. et al. (2021): Measurement of temperature induced X-ray tube transmission target displacements for dimensional computed tomography, Precis. Eng.
- VDI/VDE 2630 Richtlinien: Computertomografie in der dimensionellen Messtechnik.

Das METAS-CT ist als metrologisches Referenzsystem für die Entwicklung, die Validierung und die Rückführung von CT-Messverfahren ausgelegt, während kommerzielle metrologische CT-Systeme primär für robuste und effiziente industrielle Messaufgaben optimiert sind.

Aspekt	METAS-CT	Kommerzielles CT
Verwendung	Referenz/Forschung/ Fehlersuche	Industrie/QS
Rückführbarkeit	Direkt und SI-basiert	Indirekt/artefaktbasiert
Unsicherheit	Modellbasiert, $0,3 \mu\text{m} + 2 \cdot 10^{-5} \cdot L$ (unidirectional)	Spezifikationsbasiert typischerweise im Bereich $5\text{--}20 \mu\text{m}$ zuverlässig rückführbar
Systemarchitektur	Offen	Geschlossen
Messeffizienz	Niedrig	Hoch
Flexibilität	Sehr hoch	Begrenzt

PSI-Connect am METAS: Wissenschaftlerinnen in Wabern



Im November 2025 öffnete das Eidgenössische Institut für Metrologie METAS in Wabern seine Türen für rund 30 junge Wissenschaftlerinnen im Rahmen von PSI-Connect. Dieses Programm des PSI bringt ambitionierte und hoch qualifizierte Wissenschaftlerinnen zu spannenden Arbeitgebern. Das METAS stellte seine Rolle als nationales Metrologieinstitut vor und zeigte auf, wie wissenschaftliche Expertise, angewandte Forschung und gesellschaftliche Verantwortung zusammenwirken.

Neben Einblicken in unterschiedliche Karrierewege bot der Anlass praxisnahe Workshops und den direkten Austausch mit den METAS-Fachbereichen. Der Anlass unterstrich die gute Zusammenarbeit zwischen dem PSI und dem METAS in verschiedenen Bereichen sowie die Bedeutung des METAS als Plattform für Vernetzung, Talentförderung und den nachhaltigen Dialog zwischen Forschung und Anwendung.

Das METAS beteiligt sich am NCCR-Projekt «Precision»

Das Staatssekretariat für Bildung, Forschung und Innovation hat neue nationale Forschungsschwerpunkte genehmigt. Das METAS ist mit seinem **Labor für Photonik, Zeit und Frequenz Teil des NCCR Precision**.

Gemeinsam mit Partnern der ETH Zürich, der Universität Basel, der EPFL, dem Paul Scherrer Institut (PSI), der Universität Neuenburg sowie dem CSEM treibt das METAS den Aufbau einer hochgenauen optischen Uhr voran. Damit stärkt die Schweiz ihre internationale Spitzenposition in der präzisen Messung von Zeit und Frequenz und schafft so neue Möglichkeiten für die Erforschung grundlegender physikalischer Phänomene. Die Anwendungen schaffen auch eine Grundlage für Innovation, Forschung und technologische Souveränität des Standorts Schweiz.



Link zum Bericht:

https://www.sbfi.admin.ch/dam/de/sd-web/s2DtVF0Q6021/NFS_Precision_DE.pdf

Gemeinsames Engagement für die Schweizer Qualitäts- infrastruktur

Das METAS, die Schweizerische Akkreditierungsstelle SAS (SECO) und die Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV) haben am 4. Februar 2026 eine Absichtserklärung zur verstärkten Zusammenarbeit innerhalb der Schweizer Qualitätsinfrastruktur (QI) unterzeichnet. Ziel ist es, Synergien zu nutzen sowie Effizienz, Sichtbarkeit und Nutzen der QI für Wirtschaft, Gesellschaft und Verwaltung weiter zu erhöhen.

Hinweis: In der nächsten Ausgabe von «Die Referenz.» berichten wir vertieft über die Schweizer Qualitätsinfrastruktur und ihre Bedeutung.



Kooperationsabkommen zwischen dem Azerbaijan Institute of Metrology und dem Eidgenössischen Institut für Metrologie METAS

Das Azerbaijan Institute of Metrology und das Eidgenössische Institut für Metrologie METAS der Schweiz haben ein Abkommen über wissenschaftlich-technische Zusammenarbeit (MOU) unterzeichnet. Es schafft einen Rahmen für den Austausch von Fachwissen, die gemeinsame Weiterentwicklung metrologischer Kompetenzen sowie die Förderung von Innovation. Die Vereinbarung betont die zentrale Rolle der Metrologie für nachhaltigen wirtschaftlichen und technologischen Fortschritt.



Science Slam am METAS: Wissenschaft mit Bühnenpräsenz

Am 9. Dezember 2025 fand am METAS der erste Science Slam statt. Ziel des Events war es, Wissenschaft und Forschung kreativ, verständlich und unterhaltsam zu vermitteln. In maximal fünf Minuten präsentierten die Teilnehmenden des METAS ihre komplizierten Arbeitsinhalte aus Wissenschaft und Metrologie und lernten dabei, Unwesentliches wegzulassen und eine klare Geschichte zu erzählen. Der Anlass fand in Zusammenarbeit mit der Universität Freiburg statt. Dank der grossen Erfahrung in der Durchführung von Science Slams hat das Team der Universität Freiburg es verstanden, die Teilnehmerinnen und Teilnehmer des METAS bestens auf den Science Slam vorzubereiten, und auch während des Anlasses eine super Stimmung geschaffen. Merci beaucoup an alle Beteiligten!



Neue Laborleitungen im Bereich Metrologie in der Chemie und der Biologie

Im Jahr 2025 wurden zwei Leitungsfunktionen im Bereich Metrologie in der Chemie und der Biologie neu besetzt. Zum 1. September 2025 übernahm Dr. Julie Tolu die Leitung des Labors für Organische Analytik und Referenzen. Sie verfügt über umfassende Erfahrung in der analytischen Chemie, insbesondere in massenspektrometrischen Verfahren zur Bestimmung von Schadstoffen und Elementen in Umwelt- und biologischen Proben. Zudem bringt sie eine mehrjährige Erfahrung in der (Co-)Leitung von Forschungsprojekten mit, einschliesslich der Betreuung von Masterstudierenden, Doktorierenden und Postdocs. Zum 15. Oktober 2025 übernahm Dr. Tobias Heck die Funktion des Laborleiters Biologische Analytik und Referenzen (BAR). Er bringt fundierte Expertise in der Proteinbiochemie sowie langjährige Erfahrung aus leitenden Funktionen in der Pharmaindustrie, unter anderem im Bereich Process Analytical Technology, mit.





Dienstleistung

Auf der Spur von PFAS in Lebensmitteln und Blut

Antihafbeschichtungen von Küchenutensilien, fett- und wasserabweisende Textilien, beschichtete Papiere und Kartons, Pestizide oder Feuerlöschschäume: PFAS werden in zahlreichen industriellen Prozessen und Produkten eingesetzt. Doch um welchen Preis?

Dr. Alexandra Jaus

PFAS (aus dem Englischen *per- and polyfluoro-alkyl substances*) sind eine Gruppe von schwer abbaubaren Chemikalien, die seit Jahrzehnten hergestellt werden. Aufgrund ihrer wasser-, fett- und schmutzabweisenden Eigenschaften werden sie in zahlreichen industriellen Prozessen und Produkten verwendet.

Durch die extrem starken Kohlenstoff-Fluor-Bindungen sind PFAS thermisch und chemisch äusserst stabil. So vorteilhaft dies für viele Anwendungen ist, so problematisch sind PFAS in der Umwelt, wo sie kaum abbaubar sind (siehe Abbildung 1). PFAS sind persistent und werden daher auch als Forever Chemicals (Ewigkeitschemikalien) bezeichnet. In Kombination mit ihrer oftmals hohen Toxizität und Fähigkeit, sich anzureichern, stellen PFAS für die Forschung, die Wirtschaft und die Politik eine grosse Herausforderung dar.

Auswirkungen von PFAS auf die Gesundheit

PFAS gelangen hauptsächlich über die Ernährung in den menschlichen Körper und können sich dort

anreichern. Nach heutigem Wissensstand sind für einige PFAS (z.B. Perfluorooctansulfonsäure [PFOS] und Perfluorooctansäure [PFOA], siehe Abbildung 2) gesundheitsschädigende Wirkungen bekannt. Bei vielen PFAS bestehen aber noch grosse Kenntnislücken. Risikobewertungen der Europäischen Lebensmittelsicherheitsbehörde (EFSA) und des deutschen Bundesinstituts für Risikobewertung (BfR) kommen zum Schluss, dass ein Zusammenhang zwischen den PFAS-Gehalten im Blut und einer verminderten Konzentration von Antikörpern nach einer Impfung besteht. Impfungen können damit weniger wirksam sein. Zudem wird von den zwei Organisationen auf weitere mögliche negative Auswirkungen von hohen PFAS-Konzentrationen im Blut hingewiesen, zum Beispiel auf die Leber, die Nieren oder auf das Geburtsgewicht.

PFAS im Blut der Schweizer Bevölkerung

Im Rahmen der Pilotphase der Schweizer Gesundheitsstudie, welche vom Bundesamt für Gesundheit (BAG) initiiert wurde, erfolgte ein Humanbiomonitoring bei mehreren Hundert Erwachsenen. Dabei



Abbildung 1: Typische Anwendungen von PFAS.

sollte unter anderem der Einfluss von Chemikalien auf die Gesundheit erforscht werden und es wurden verschiedene Substanzen in Blut und Urin der Teilnehmenden gemessen. Das Labor Organische Analytik und Referenzen des METAS hat im Auftrag des Bundesamts für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen (BLV) und zusammen mit weiteren Partnern hierzu kürzlich eine wissenschaftliche Publikation veröffentlicht¹, in der die Gehalte von 30 PFAS im Serum von 630 Personen aus den Kantonen Bern und Waadt bestimmt wurden.

Die hierbei ermittelte Exposition der Bevölkerung der beiden Schweizer Kantone lag für alle Substanzen im gleichen Bereich wie in anderen europäischen Ländern. Gesundheitlich relevant war – wie auch in den anderen Ländern – die Belastung mit PFOS, da für knapp 4% der Teilnehmenden der gesundheitsrelevante Schwellenwert für PFOS überschritten war. Diese Substanz wurde vor mehr als 10 Jahren in der EU und der Schweiz – abgesehen von wenigen Ausnahmen – verboten, ist aber aufgrund der langen Lebensdauer und der hohen Mobilität immer noch in der Umwelt und im menschlichen Körper zu finden.

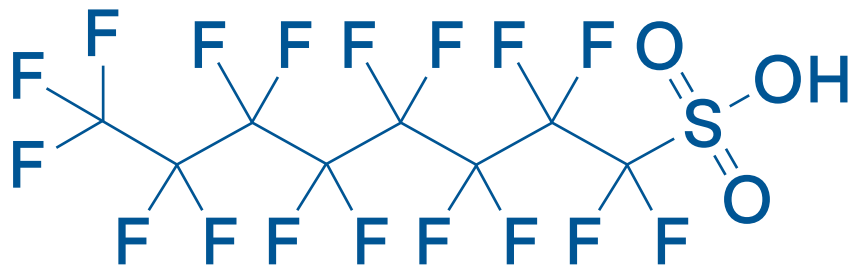
Details zu dieser Biomonitoring-Studie finden sich auf der BAG-Website².

Analyse von Fischen in Schweizer Seen

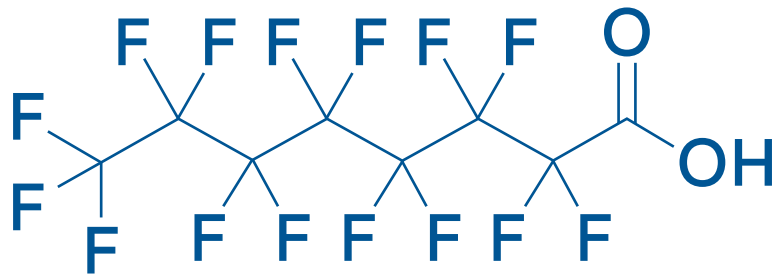
Um die Aufnahme von PFAS zu reduzieren, gelten vor allem für Trinkwasser und gewisse Lebensmittel tierischer Herkunft Höchstwerte für PFAS.

In diesem Zusammenhang wurden im BLV-Labor Organische Analytik bereits Fische aus verschiedenen Schweizer Seen auf PFAS untersucht und die Ergebnisse 2023 durch das METAS in einer wissenschaftlichen Mitteilung³ publiziert. Auch wenn Fisch von bekannten kontaminierten Orten ausgeschlos-

- 1 Jaus, A., Fragnière Rime, C., Riou, J., Brüscheiler, B.J., Bochud, M., von Goetz, N. (2025). Serum biomonitoring of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in the adult population of Switzerland: Results from the pilot phase of the Swiss health study. *Environment International*, 198, 109382. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2025.109382>
- 2 <https://www.bag.admin.ch/de/human-biomonitoring-projekte-in-der-schweiz>
- 3 Jaus, A., Rhyn, P., Valentini, J. (2023). Trace Level Analysis of Per- and Polyfluorinated Substances in Fish from Various Regions in Switzerland. *Toxics*, 11(11), 909. <https://doi.org/10.3390/toxics11110909>



PFOS (perfluorooctanesulfonic acid)



PFOA (perfluorooctanoic acid)

Abbildung 2: Chemische Struktur der zwei typischen PFAS-Moleküle PFOS und PFOA.

sen wurde, zeigt diese Studie, dass Fisch aus Wildfang eine PFAS-Quelle bei der menschlichen Ernährung sein kann.

Laufende Projekte

Aktuell führt das Labor Organische Analytik und Referenzen im Auftrag des BLV eine grosse Monitoring-Studie über PFAS in Milch und Milchprodukten sowie pflanzlichen Lebensmitteln durch. Die Herausforderung liegt darin, einerseits eine genügend empfindliche und dennoch robuste Methode zu entwickeln, welche PFAS im Ultraspurenbereich nachweisen kann. Andererseits darf die Methode aber auch nicht extrem aufwendig sein, um effizient mehrere Hundert Proben aufarbeiten und analysieren zu können. Die Ergebnisse zu Milch und Milchprodukten sowie Resultate weiterer tierischer Proben wurden kürzlich vom Verband der Kantonschemiker veröffentlicht und ergaben, dass Lebensmittel auf dem Schweizer Markt die geltenden Höchstwerte weitgehend einhalten. Jedoch zeigte sich auch, dass PFAS weitverbreitet und in allen

Lebensmittelkategorien in geringen Konzentrationen nachweisbar sind: Weitere Untersuchungen sind daher dringend angezeigt.

Ausserdem führt das Labor derzeit im Auftrag des BLV und in Zusammenarbeit mit dem BAG eine Analysekampagne zu PFAS in Serumproben von Kindern und Jugendlichen durch. Die Proben stammen aus der menuCH-Kids-Studie, einer Schweizer Erhebung, die darauf abzielt, die Ernährungsgewohnheiten von Kindern und Jugendlichen im Alter von 6 bis 17 Jahren besser zu verstehen. Im Rahmen dieser Studie wurden etwa 800 Blutproben entnommen. Diese werden im ersten Semester 2026 analysiert, um die PFAS-Gehalte zu quantifizieren. Den PFAS bleibt das METAS also auf der Spur. ●

Objekt

Die stille Schicht – PFAS in der zweiten Haut des Alltags

PFAS sorgen dafür, dass funktionale Textilien Wasser abweisen und dennoch atmungsaktiv bleiben. Doch was geschieht bei deren Herstellung, Abrieb, Nutzung oder Entsorgung? Welche Stoffe gelangen in die Umwelt? Die Fragen sind komplex, die Datenlage unvollständig. Klar ist: Ohne präzise, vergleichbare Messungen bleibt das Unsichtbare unscharf. Metrologie liefert die Basis, um PFAS nachzuweisen, Grenzwerte festzulegen und technische Innovation verantwortungsvoll zu begleiten.

Forschung und Entwicklung

PFAS: Harmonisierung und Verbesserung der Analyse dieser Ewigkeitschemikalien

PFAS sind persistente und bioakkumulierbare Stoffe, die aufgrund ihrer gesundheitlichen Auswirkungen zunehmend an Bedeutung gewinnen. Das Labor Organische Analytik und Referenzen des METAS hat die Wichtigkeit von deren analytischer Bestimmung erkannt und beteiligt sich am europäischen Metrologieprojekt 23IND13 ScreenFood. Das Ziel dieses Projektes ist, metrologische Werkzeuge einschliesslich Referenzmaterialien und Analysemethoden zu entwickeln, um zuverlässige Messungen zu gewährleisten und so europaweit vergleichbar zu machen.

Marina Chardonens

Eine grosse Herausforderung für Forschung und Regulierung

In den letzten Jahren sind PFAS in der Wissenschaft, bei den Gesundheitsbehörden und in der Öffentlichkeit auf wachsendes Interesse gestossen. Aufgrund ihrer Eigenschaften (Persistenz, Bioakkumulation, gesundheitsschädliche Auswirkungen) gelten PFAS für Forschung und Regulierung heute als grosse Herausforderung.

PFAS bilden eine sehr grosse Familie mit mehr als 4000 verschiedenen Verbindungen. Allerdings wurden bislang nur wenige davon ausreichend untersucht, um vollständige toxikologische und umweltrelevante Daten zu erhalten. Aus diesem Grund sind bisher nur vier PFAS, die als PFOA, PFOS, PFNA und PFHxS bezeichnet werden, in Europa reguliert.

Regulierung zum Schutz der öffentlichen Gesundheit

Die Europäische Kommission (EK) hat für die obgenannten vier Verbindungen Höchstwerte in bestimmten Lebensmitteln (EU 2023/915) sowie Bestimmungsgrenzen (LOQs) (EU 2022/1431) festgelegt, die bei den Analysen einzuhalten sind. Die Bestimmungsgrenze (LOQ) ist die kleinste Menge eines Stoffes, die eine Methode (inkl. Probenvorbereitung und Stoffquantifizierung) zuverlässig und genau ermitteln kann. Unterhalb dieser Grenze kann ein Vorkommen festgestellt, die genaue Menge je-

doch nicht bestimmt werden. Diese Massnahmen der Europäischen Kommission (EK) zielen darauf ab, die öffentliche Gesundheit zu schützen und die Überwachung dieser Stoffe in den Mitgliedstaaten zu harmonisieren. Seit 2024 hat die Schweiz die europäischen Empfehlungen zu den zulässigen Höchstgehalten teilweise übernommen.

Die übrigen PFAS sind weiterhin unreguliert, und es treten neue, sogenannte Emerging PFAS auf, die regulierte PFAS ersetzen sollen.

PFAS im Projekt 23IND13 ScreenFood

Das Projekt ScreenFood hat zum Ziel, die für eine zuverlässige PFAS-Analyse in Lebensmitteln erforderlichen metrologischen Werkzeuge zu entwickeln. Es umfasst die Entwicklung robuster Analysemethoden und die Herstellung zertifizierter Referenzmaterialien, die für die Rückverfolgbarkeit und die Vergleichbarkeit von Labormessungen unerlässlich sind.



Abbildung 1: Logo des Projekts.

Im Einklang mit den EU-Empfehlungen zur PFAS-Überwachung beteiligt sich ScreenFood am Aufbau eines metrologischen Netzwerks, das die Harmonisierung und die internationale Anerkennung der Analyseergebnisse unterstützen kann. Das vom Euramet-Netzwerk finanzierte Projekt erstreckt sich seit 2024 über drei Jahre und bringt das METAS, Industriepartner, akademische Akteure sowie mehrere ausländische Labore und Institute zusammen.

Das Projekt ist gemäss unten stehender Darstellung in mehrere Arbeitspakete (Work packages / WP) unterteilt:

Das METAS beteiligt sich hauptsächlich an der Entwicklung von zertifizierten Referenzmaterialien (WP1), der Erarbeitung von Analysemethoden (WP2) und der Organisation eines Vergleichs unter Verwendung der im WP1 (WP4) hergestellten Referenzmaterialien. Da das WP4 noch nicht gestartet wurde und WP1 und WP2 bereits weit fortgeschritten sind, befasst sich dieser Beitrag vor allem mit diesen beiden Teilen.

Entwicklung zertifizierter Referenzmaterialien (CRM)

Die Matrix-Referenzmaterialien wurden ausgewählt, um konkreten analytischen Anforderungen gerecht zu werden. Es wurden zwei Arten von Matrizen ausgewählt: eine Tomatensauce und ein Getreideprodukt für die Kinderernährung. Diese Auswahl stützt sich auf mehrere Kriterien: Einerseits gibt es derzeit kein gleichwertiges oder vergleichbares Material auf dem Markt. Andererseits sind diese Matrizen in ihrer Zusammensetzung komplementär (z.B. unterschiedliche Wasser-, Fett-, Stärke- und Zuckergehalte), sodass ein grosser analytischer Bereich abgedeckt werden kann.

Schliesslich stellen diese beiden Matrizen eine grosse analytische Herausforderung dar, da die Bestimmungsgrenzen (LOQs) der EU-Empfehlungen für derartige Produkte besonders niedrig sind. Deshalb sind sie ideale Kandidaten für eine anspruchsvolle metrologische Entwicklung.



Abbildung 2: Messinstrument: Flüssigchromatograf (LC) gekoppelt mit einem Tandem-Massenspektrometer (MS/MS).

Umsetzungsplan

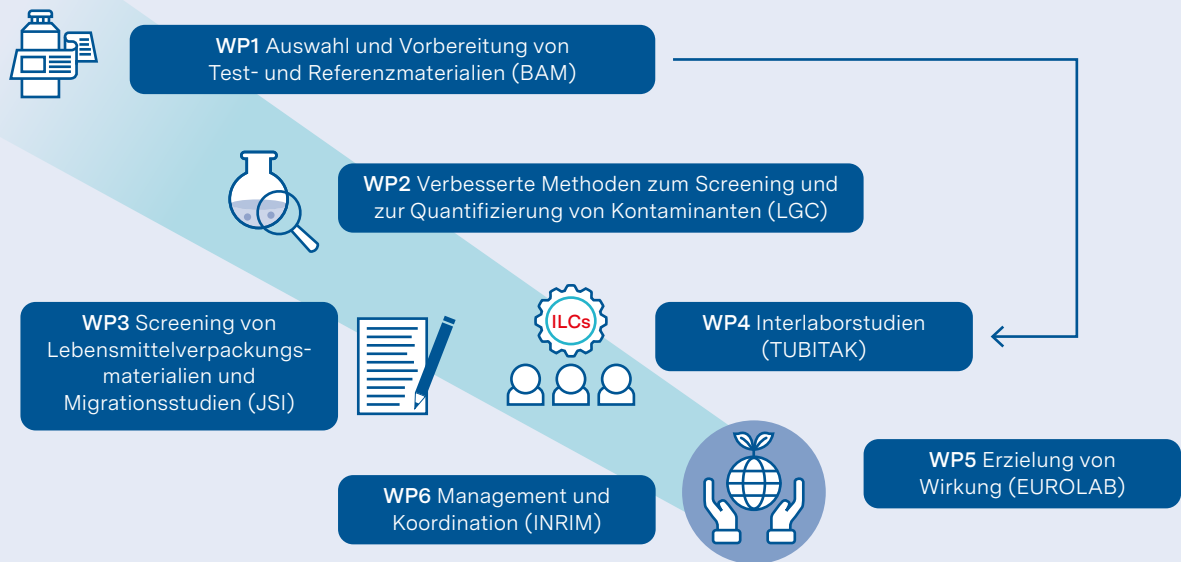


Abbildung 3: Implementierung der Arbeitspakete (WP) im 23IND13 ScreenFood-Projekt. (Grafik: INRIM)

Analysemethode

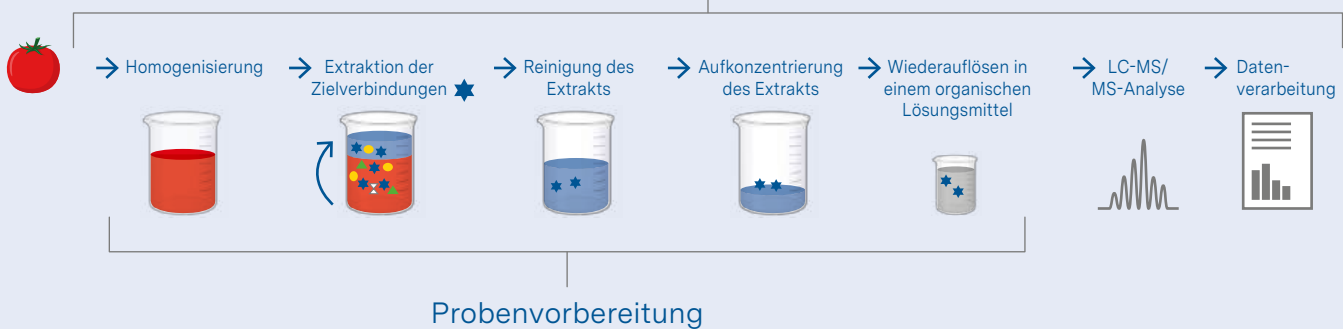


Abbildung 4: Standardverfahren einer Methode zur Analyse von PFAS in einer Lebensmittelmatrix.

Nachdem die Matrizen definiert waren, wurden die Analyten hauptsächlich im Hinblick auf die gesetzlichen Bestimmungen und die aktuellen gesundheitlichen Bedenken ausgewählt. Insgesamt wurden 24 PFAS ausgewählt.

Diese beiden Referenzmaterialien (Tomatensauce und Getreideprodukt für Kinder, die beide alle 24 PFAS enthalten) werden derzeit vom Nationalen Institut für Metrologie der Türkei (TÜBITAK) entwickelt. Es gibt keine universelle Methode, um Referenzmaterialien in einer Lebensmittelmatrix herzustellen. Je nach gewählter Matrix und Zielanalyten ist das Vorgehen sehr unterschiedlich. Um hochwertige Referenzmaterialien zu erhalten, ist es unerlässlich, darauf zu achten, dass die Verbindungen

(PFAS) während des Herstellungsprozesses nicht verändert werden. Ihre spezifischen Eigenschaften wie Flüchtigkeit, Photodegradation oder Neigung zur Adsorption auf bestimmten Oberflächen müssen daher berücksichtigt werden. Aus diesem Grund werden derzeit verschiedene experimentelle Ansätze von TÜBITAK getestet, um die geeignetsten Bedingungen zu ermitteln. Das METAS und andere Partner sind dafür zuständig, die von TÜBITAK entwickelten Referenzmaterialien vorab zu testen, um das beste Material auszuwählen.

Diese Materialien werden später für die im WP4 vorgesehenen Ringversuche verwendet. Die Ergebnisse dieser Tests werden unter anderem die Bestimmung des zertifizierten Referenzwerts und die Abschätz-

zung der damit verbundenen Unsicherheit nach den internationalen metrologischen Anforderungen ermöglichen.

Entwicklung analytischer Methoden

Methodenentwicklung ist der Prozess, ein analytisches Verfahren zu entwickeln und zu optimieren, mit dem Analyten – in diesem Fall PFAS – in einer gegebenen Matrix – in diesem Fall Tomatensauce und ein Getreideprodukt für die Kinderernährung – zuverlässig gemessen werden können. Es ist beabsichtigt, die notwendigen Schritte (Extraktion, Reinigung, Konzentration usw.) der Probenvorbereitung zu ermitteln, die relevanten Parameter der analytischen Messmethode auszuwählen und diese Bedingungen schrittweise anzupassen, um ein Verfahren zu erhalten, das hinsichtlich Empfindlichkeit, Selektivität, Präzision und Robustheit leistungsfähig ist.

Die grösste analytische Herausforderung bei diesem Projekt liegt in der Fähigkeit der Methode, die erforderlichen Bestimmungsgrenzen (LOQs) zu erreichen und gleichzeitig eine ausreichende Präzision und Richtigkeit zu gewährleisten. Diese Anforderung ist entscheidend, um Referenzmaterialien korrekt charakterisieren zu können.

Die Vorbereitung der Proben ist ein wichtiger Schritt zur Reduktion der LOQs und muss sorgfältig optimiert werden.

Der Prozess der PFAS-Analyse in Lebensmitteln entspricht in der Regel der Abbildung 4.

In einem ersten Schritt des Verfahrens wird die Probe homogenisiert. Bei der Extraktion liegt das Augenmerk auf der ausschliesslichen Extraktion der Verbindungen von Interesse. Danach geht es darum, nur die Verbindungen von Interesse (hier PFAS) ohne gleichzeitige die Koextraktion anderer Bestandteile, wie Zucker oder Pigmente. Um die angestrebten geringen Mengen an PFAS messen zu können, muss der Extrakt vor der Analyse aufkonzentriert werden.

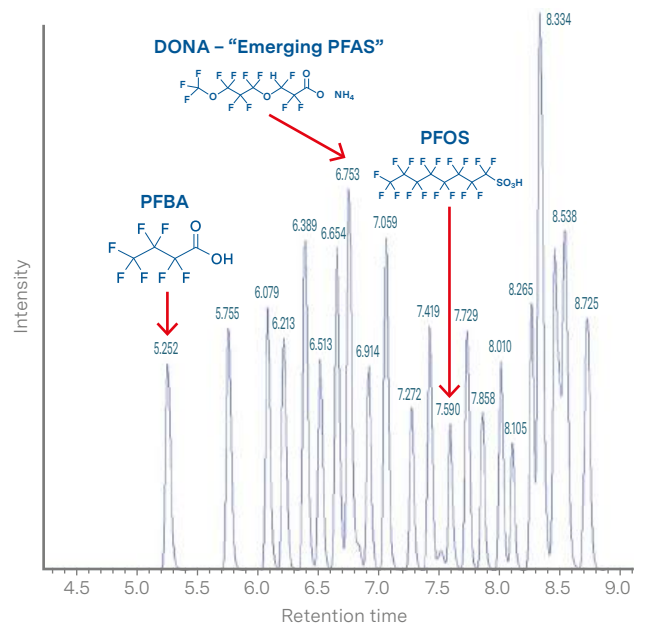


Abbildung 5: Chromatogramm LC MS/MS mit folgenden PFAS: PFBA = Perfluorbutansäure, DONA = Ammoniumsalz der Perfluor-4.8-dioxa-3H-nonansäure und PFOS = Perfluorooctansulfonsäure.

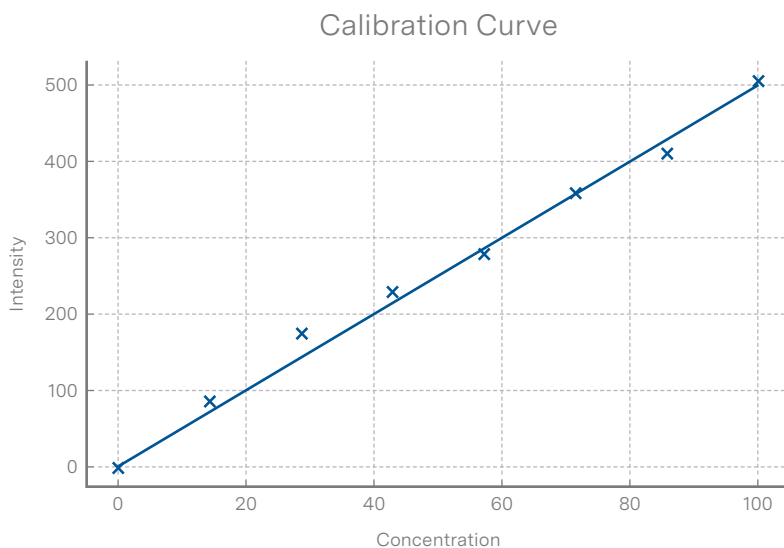


Abbildung 6: Kalibriergerade (oder Kalibrierkurve) mit Konzentration des Analyten auf der X-Achse und der vom Detektor gemessenen Intensität auf der Y-Achse.

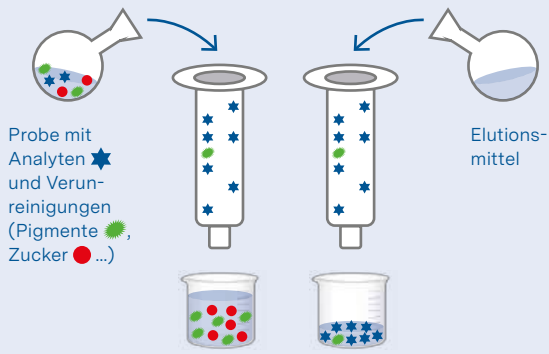


Abbildung 7: Funktionsprinzip einer SPE.

Die relevanten Verbindungen werden mittels Flüssigchromatografie (LC) gekoppelt und mit einem Tandem-Massenspektrometer (MS/MS) identifiziert und quantifiziert, wie in den Abbildungen 2 bis 6 dargestellt. Vereinfacht gesagt, werden PFAS durch LC aufgetrennt und von MS/MS in Form von Peaks detektiert. Jeder Peak entspricht einer Verbindung und seine Intensität ist proportional zur Menge in der Probe (siehe Abbildung 5). Die Quantifizierung erfolgt dann mithilfe einer Kalibriergerade. Sie wird aus Lösungen bekannter Kalibrantkonzentrationen aufgebaut (Abbildung 6), die im Idealfall zertifiziert sind.

Derzeit testet das METAS zusammen mit den anderen Partnern mehrere Ansätze für 1) die Extraktion von Analyten (PFAS) aus der Matrix (Tomatensauce) und 2) die Vorkonzentration und die Reinigung des Extrakts, um mit den PFAS koextrahierte Substanzen zu entfernen, die deren Nachweis und Quantifizierung beeinträchtigen. Am METAS wurden insbesondere eine Flüssig-Flüssig-Extraktion und eine Ionenpaar-Extraktion für den Extraktionsschritt evaluiert, während die QuEChERS-Methoden (Quick Easy Cheap Effective Rugged and Safe) und die Verwendung verschiedener SPE-Kartuschen (Solid Phase Extraction) für die Reinigung und die Aufkonzentration untersucht wurden. Die SPE beruht darin, dass die Probe durch eine Festphase (Harz) geleitet wird, deren chemische Eigenschaften es ermöglichen, die untersuchten Analyten selektiv zurückzuhalten, bevor sie mit einer kleinen Menge an Lösungsmittel eluiert werden, sodass sie vor der Analyse isoliert, gereinigt und konzentriert werden können (siehe Abbildungen 7, 8 und 9). Konkret werden PFAS zunächst auf dem Harz zurückgehalten, während Zucker, Pigmente und andere Verbindungen, die nicht mit dem Harz interagieren, ungehindert durch die Kartusche fließen und ausgeschieden werden. Danach wird ein spezielles Lösungsmittel verwendet, um die Wechselwirkung



Abbildung 8: Befüllung der SPE-Kartuschen mit den Proben.

Abbildung 9: Gereinigter Extrakt nach Beseitigung der Verunreinigungen.

zwischen den PFAS und dem Harz zu unterbrechen und sie zu eluieren. So wird eine Lösung erhalten, die das Lösungsmittel selbst und die PFAS enthält, nachdem die übrigen unerwünschten Verbindungen in den vorangegangenen Schritten beseitigt worden sind.

Sobald die Entwicklung der Methode abgeschlossen ist (d.h. nach der Bestimmung der optimalen Bedingungen), geht sie in die Validierungsphase. In diesem Schritt werden verschiedene Parameter wie Robustheit, Präzision und Richtigkeit bewertet. Während der Validierungsphase wird auch die Messunsicherheit abgeschätzt, die für die Quantifizierung der untersuchten Stoffe von zentraler Bedeutung ist.

Die validierte Methode wird für die Analyse von Referenzmaterialien im Ringversuch (WP4) verwendet.

Zuverlässige Messungen für die Quantifizierung der PFAS sicherstellen

Das europäische **ScreenFood-Projekt** zielt darauf ab, die PFAS-Analyse in Lebensmitteln durch die Entwicklung **zertifizierter Referenzmaterialien** und **robuster Analysemethoden** zu verbessern. Diese Tools gewährleisten zuverlässige Messungen, die unter Einhaltung der in Europa geltenden Grenzwerte zwischen Labors vergleichbar sind. Das METAS beteiligt sich aktiv an der Entwicklung dieser Materialien und Methoden. ●

<https://www.screenfood.eu/>

The project 23IND13 ScreenFood has received funding from the European Partnership on Metrology, co-financed from the European Union's Horizon Europe Research and Innovation Programme and by the Participating States.



Dienstleistung

Neues Primärnormal zur Durchflusskalibrierung mit Wasserstoff

Das METAS hat ein neues Primärnormal zur Kalibrierung von Durchfluss mit Wasserstoff entwickelt. Die Anlage wird als $pVTt$ bezeichnet, da die Größen Druck (p), Volumen (V), Temperatur (T) und Zeit (t) eine zentrale Rolle spielen. Die Anlage kann sowohl mit reinem Wasserstoff als auch mit Wasserstoff angereichertem Erdgas betrieben werden und dient der Kalibrierung von Venturi-Düsen mit kritischem Durchfluss sowie Gaszähler.

Dr. Hugo Bissig, Sven Hellmüller

Die ideale Gasgleichung $p V = n R T$ ist ein in der Physik und der Messtechnik etablierter Zusammenhang zwischen dem Druck (p), dem Volumen (V), der Stoffmenge (n), der absoluten Temperatur (T) und der universellen Gaskonstante (R). Das Messprinzip der $pVTt$ -Anlage nutzt diesen Zusammenhang, um die in einem Volumen enthaltene Stoffmenge eines realen Gases unter Berücksichtigung des Kompressibilitätsfaktors zu bestimmen.

Die Referenzvolumen im Wasserbad

Abbildung 1 zeigt die Anlage. Rechts hinten ist ein Wasserbad erkennbar, in dem fünf Behälter einge-

taucht sind. Diese Behälter sind die Referenzvolumina (drei mit 200 l, einer mit 50 l und einer mit 10 l Fassungsvermögen), in denen das durch die Messstrecke geflossene Gas gesammelt wird. Sie befinden sich im Wasserbad zur Gewährleistung der Temperaturstabilität und einer homogenen Temperaturverteilung innerhalb der Referenzvolumina.

Der Grund für die Notwendigkeit des Wasserbades liegt darin, dass das in den Behälter strömende Gas Energie mitbringt. Diese Energie führt zu einem Temperaturanstieg im Behälter, während die zunehmende Gasmenge den Druck erhöht. Um das Gas im

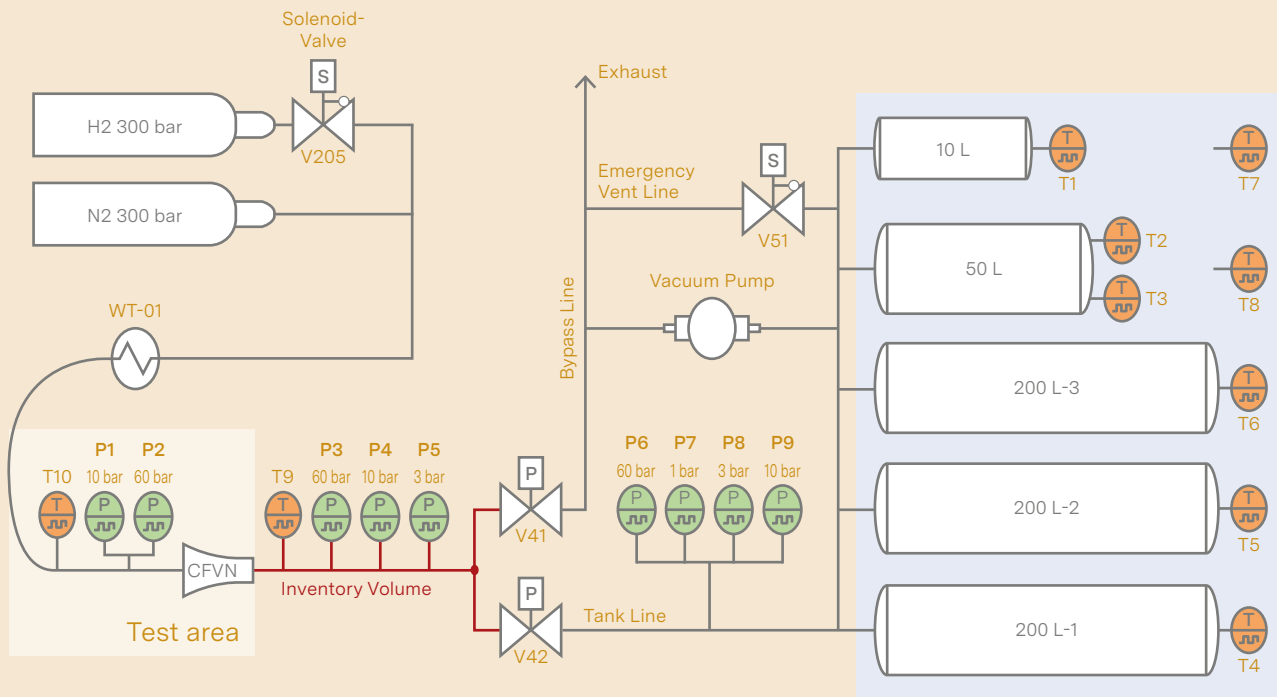


Abbildung 1: PID-Schema der Anlage mit Messstrecke und Ventilen (Mitte) sowie Wasserbad mit Behältern (unten rechts).



Abbildung 2: Übersicht der Anlage mit Steuer-PC (vorne links), Messstrecke mit Ventilen (hinten links), Wasserbad mit Behältern (hinten rechts) sowie Elektronikkasten (vorne rechts).

Behälter wieder abzukühlen, muss dem Gas Wärme wieder entzogen werden. Die Wärme strömt durch die Wand des Behälters in das kühlere Wasser, wobei die zugeführte Energie dem Wasser im Bad über einen Wärmetauscher wieder entzogen wird. So werden das Wasser und das Gas im Behälter nach dem Stoppen des Durchflusses auf rund 20 °C abgekühlt und stabil gehalten.

Wie wird die gesammelte Gasmenge bestimmt

Das Referenzvolumen wird vor einer Messung vakuumiert, sodass nur noch eine sehr geringe Menge an Gas darin verbleibt. Der Druck und die Temperatur werden gemessen; daraus kann die Dichte des Gases unter den Bedingungen zu Beginn der Messung bestimmt werden. Anschliessend wird das Gas unter konstantem Durchfluss in das Referenzvolumen umgeleitet. Der Zeitpunkt dieser Umleitung setzt den Zeitstempel des Messbeginns. Währenddessen strömt das Gas in das Referenzvolumen, wobei der Druck und die Temperatur ansteigen.

Sobald der gewünschte Druck erreicht ist, wird das Gas unter konstantem Durchfluss vom Referenzvolumen wieder weggeleitet. Diese Umschaltung bestimmt den Zeitstempel des Messendes; die Differenz der beiden Zeitstempel ergibt die Messzeit. Anschliessend wird die Temperatur des Gases im Referenzvolumen stabilisiert, sodass sich auch der Druck im Referenzvolumen nicht mehr ändert. Nach einer gewissen Wartezeit zeigen die Daten der Druck- und Temperatursensoren, dass keine Änderungen mehr auftreten. Zu diesem Zeitpunkt können der Druck und die Temperatur des Gases bestimmt und die Dichte berechnet werden.

Mit den Dichten zu Beginn und am Ende der Messung, der Messzeit und des kalibrierten Volumensinhaltes des Referenzvolumens wird der durchschnittliche Massendurchfluss berechnet. Ist der Volumendurchfluss von Interesse, wird der Massendurchfluss mit der Dichte an der Messstrecke dividiert.

Was sind Venturi-Düsen mit kritischem Durchfluss

Venturi-Düsen mit kritischem Durchfluss werden in der Fluidtechnik eingesetzt, um einen konstanten Gasdurchfluss zu erzeugen. Die Geometrie der Verengung ist in der Norm ISO 9300:2022 definiert. Ist der Druck vor der Düse ausreichend hoch, strömt das Gas mit Schallgeschwindigkeit durch die Verengung und dieser Durchfluss ist maximal und unabhängig vom Druck hinter der Düse (kritischer Durchfluss). Die kalibrierten Venturi-Düsen werden dann als Referenznormal zur Kalibrierung von Messgeräten verwendet.

Angewandter Durchflussbereich

Die Anlage ist für die Kalibrierung von Haushaltsgaszähler und Referenzzähler von Kalibrieranlagen ausgelegt. Der angestrebte Durchflussbereich liegt bei 0,1 bis 250 g/min bei Drücken bis zu 40 bar, wobei eine erweiterte Messunsicherheit von 0,3% angestrebt wird. Zurzeit werden umfassende Validierungs- und Charakterisierungsmessungen durchgeführt, um die wesentlichen Unsicherheitskomponenten und deren Beiträge zu ermitteln. ●



Metrologie allgemein

Über die Zukunft der Metrologie

2025 hat die Metrologie-Gemeinschaft den 150. Jahrestag des Metervertrags zelebriert¹. Kann uns dieser historische Schritt hin zu einem harmonisierten Einheitensystem etwas lernen für die Metrologie der Zukunft? Oder gibt es in der Gegenwart Vorboten aus der Zukunft, die uns erlauben, Entwicklungsszenarien für die Metrologie zu entwerfen?

EIDGENÖSSISCHES INSTITUT FÜR METROLOGIE
- SWISS INSTITUTE OF METROLOGY

Dieses Bild wurde KI-generiert.

Dr. Hugo Lehmann

Als wissenschaftlich denkende Menschen werden Metrologen skeptisch sein, wenn es darum geht, die Zukunft vorauszusagen, und sich wohl eher an Niels Bohr halten, der das Bonmot geprägt hat «*Prognosen sind schwierig, besonders wenn sie die Zukunft betreffen!*». Aber im Spezifischen – etwa bei der Berechnung der Planetenbahnen – erlaubt sich der Physiker Vorhersagen, nämlich wenn er mit experimentell überprüften Formeln die Natur beschreibt. Aber die Zukunft der Gesellschaft oder auch nur der Börsenkurs befolgt eben nicht die Himmelsmechanik!

Vielleicht gibt es aber doch Vorboten der künftigen Entwicklung, die bereits im Hier und Jetzt vorhanden sind. Sehr treffend hat dies der Science-Fiction-Autor William Gibson ausgedrückt: «*The future is already here, it's just not evenly distributed.*» Solche Signale der Zukunft sind in der Gegenwart vorhanden, werden jedoch nicht als solche wahrgenommen oder sind nur in spezifischen Gesellschaftsschichten erkennbar.

Wenn jedoch die Zukunft bereits hier ist, heisst das auch, dass eine gut trainierte künstliche Intelligenz (KI) grundsätzlich diese Signale aus den Daten sollte herauskristallisieren können. Wir wollen daher verschiedene KIs nutzen, um ein Zukunftsszenario für die Metrologie zu generieren. Dazu haben wir Copilot², ChatGPT³ und Perplexity⁴ benutzt.

KI als Detektor für die Signale der Zukunft

Zur Identifikation möglicher Zukunftssignale wurde der nachfolgende Prompt an drei generative KI-Systeme adressiert.

«*Kannst Du mir ein paar Signale aus der Zukunft nennen, die die Metrologie in 5–10 Jahren massgeblich verändern werden?*»

Die resultierenden Antworten sind in Tab. 1–3 dargestellt. Die Texte wurden aus Platzgründen gekürzt.

Diskussion

KI, Digitale Zwillinge, Quantentechnologien, Metrologie in der Wertschöpfungskette und Vernetzung von Messgeräten wurden von allen KIs als wichtige Zukunftstreiber detektiert. Nachhaltigkeit wurde nur von Copilot und ChatGPT erwähnt. Interessant ist, dass ChatGPT, auch ohne spezifisch danach gefragt worden zu sein, gesellschaftliche Auswirkungen wie das Vertrauen in Messresultate und den Fachkräftemangel erwähnt hat (aus Platzgründen nicht in der Tabelle aufgeführt). Die Antworten von Perplexity sind etwas ausführlicher ausgefallen.

¹ <https://www.bipm.org/en/bipm-anniversary>

² Microsoft. (2026). M365 Copilot (GPT-5 Chat Model), <https://m365.cloud.microsoft/chat/>

³ OpenAI. (2026). ChatGPT (GPT-5.2), <https://chatgpt.com/>

⁴ Perplexity AI. (2026). Perplexity AI – KI-gestützte Such- und Antwortplattform, <https://www.perplexity.ai>

Antworten von Microsoft Copilot auf eine offene Frage zu Zukunftssignalen der Metrologie (5–10 Jahre):

Signal #	Copilot
1	Thema Quantenmetrologie
	Signal Fortschritte in Quantencomputing und Quantenkommunikation
	Effekt Höchstpräzise Zeit-, Frequenz- und Feldmessungen; mögliche neue SI-Standards
2	Thema KI-gestützte Messsysteme
	Signal Integration von Machine Learning in Messprozesse
	Effekt Automatisierte Kalibrierung und Fehlererkennung; selbstkalibrierende Instrumente
3	Thema Digitale Zwillinge für Messprozesse
	Signal Industrie 4.0 und virtuelle Modelle
	Effekt Echtzeitsimulation und Optimierung; weniger physische Kalibrierung
4	Thema Blockchain für Rückverfolgbarkeit
	Signal Wachsende Bedeutung von Datenintegrität
	Effekt Fälschungssichere Messdaten und digitale Zertifikate
5	Thema Nachhaltigkeitsgetriebene Metrologie
	Signal Klimawandel und Ressourcenschonung
	Effekt Zentrale Rolle für CO ₂ -, Energie- und Kreislaufmessungen; neue «grüne» Metrologie
6	Thema Nanotechnologie und neue Materialien
	Signal Fortschritte in Materialwissenschaft
	Effekt Präzisere Messungen auf atomarer Ebene, neue Sensoren für extreme Bedingungen
7	Thema Vernetzte Messsysteme (IoT-Metrologie)
	Signal Zunehmende Vernetzung von Geräten
	Effekt Echtzeitmessdaten aus globalen Netzwerken, neue Herausforderungen bei Datenqualität und Sicherheit

Tab. 1: Copilot-generierte Antworten auf einen identischen Prompt; redaktionell gekürzt.

Trotz dieser Unterschiede erscheinen die Feedbacks konsistent und Halluzinationen sind keine zu erkennen. Um diese drei Inputs zu konsolidieren, wurde Copilot gebeten, die oben dargelegten Signale auf die wichtigsten sechs Felder zusammenzuführen. Hier seine Quintessenz:

6 zentrale Entwicklungen der Metrologie (5–10 Jahre)

1. KI-gestützte, softwaredominierte Messsysteme

Messketten werden datengetrieben; KI übernimmt Erkennung, Steuerung und Unsicherheitsmodelle. Softwarezuverlässigkeit wird zentral.

Implikationen: Richtlinien für KI in Messketten, Referenzdaten, Verfahren für Software-Validierung und Release-Kontrolle.

2. Digitale Rückführbarkeit

Kalibrierungen werden digital, automatisiert und zustandsbasiert. Zertifikate werden maschinenlesbar, Prüfpfade API-basiert.

Implikationen: Pilotierung digitaler Zertifikate, Leitfäden für digitale Rückführbarkeit und kontinuierliche Konformität.

3. Metrologie im Prozess (inline/edge) und IoT-Messnetze

Messung wandert direkt an Maschine/Produkt; vernetzte Sensorflotten liefern Echtzeitqualitätsdaten.

Implikationen: Edge-Kalibrierung, Referenzdienste für Zeit/Frequenz, Testbeds für mobile/kollaborative Messsysteme.

Antworten von ChatGPT auf eine offene Frage zu Zukunftssignalen der Metrologie (5–10 Jahre):

Signal #	ChatGPT
1	<p>Thema KI wird vom Analyse- zum Messpartner</p> <p>Signal Messsysteme treffen autonome Entscheidungen (Strategie, Abbruch, Rekalibrierung)</p> <p>Effekt Klassische Messvorschriften (statisch, normbasiert) geraten unter Druck</p>
2	<p>Thema Digitale Kalibrierketten</p> <p>Signal Cloud-Zertifikate, digitale Messmittel-Zwillinge, blockchainartige Rückführung</p> <p>Effekt Metrologie verschiebt sich von Papier-Nachweis zu Echtzeitvertrauensnachweis</p>
3	<p>Thema Metrologie wandert in den Prozess</p> <p>Signal Mehr In-Process-/Inline-Messtechnik mit geringerer Einzelgenauigkeit, aber hoher Datenintelligenz</p> <p>Effekt Klassische Labor-Metrologie verliert Monopolstellung</p>
4	<p>Thema Messunsicherheit wird kontextabhängig</p> <p>Signal Messunsicherheit richtet sich stärker nach Anwendung, Risiko und Entscheidungszweck</p> <p>Effekt Metrologie wird stärker mit Entscheidungs- und Risikotheorie verknüpft</p>
5	<p>Thema Software wird zum eigentlichen Messgerät</p> <p>Signal Zunehmend softwaredominierte Messsysteme (Sensor, Modell, KI)</p> <p>Effekt Metrologie muss Software-Engineering ernsthaft integrieren</p>
6	<p>Thema Quantenmetrologie verlässt das Forschungslabor</p> <p>Signal Industrielle Anwendungen quantenbasierter Sensoren (Zeit, Gravitation, Magnetfeld)</p> <p>Effekt Metrologisches Know-how wird noch spezialisierter – aber auch strategischer</p>
7	<p>Thema Nachhaltigkeit wird ein Messmerkmal</p> <p>Signal Nachfrage nach CO₂-Fussabdruck von Messungen, Geräten und Kalibrierungen</p> <p>Effekt «Gute Metrologie» wird auch ökologische Metrologie</p>

Tab. 2: ChatGPT-generierte Antworten auf einen identischen Prompt; redaktionell gekürzt.

4. Digitale Zwillinge und virtuelle Validierung

Virtuelle Abbilder von Messsystemen ermöglichen Simulation, Unsicherheitsanalysen und gezielte Reduktion physischer Kalibrierung.

Implikationen: Modelle validieren, Kriterien für virtuelle Kalibrierungen, Schnittstellen zu Product-Lifecycle-Management- und Fabrikationssystemen.

5. Quantenmetrologie und neue Sensorik

Quantenbasierte Zeit/Frequenznormale und neue Quantensensorplattformen werden praxistauglich.

Implikationen: universitäre Transferprogramme, Infrastruktur für verteilte Zeitdienste, Richtlinien zur Rückführung neuartiger Sensorik.

6. Nachhaltigkeitsgetriebene Metrologie und Vertrauensfokus

Messungen für CO₂, Energie, Kreislaufwirtschaft gewinnen an Bedeutung; Vertrauen und Nachvollziehbarkeit rücken ins Zentrum.

Implikationen: ökologische Bewertungsmethoden, Remote-Kalibrierung, Rahmen für «Trust by Design».

Haben wir am METAS diese Signale der Zukunft erkannt?

Aus der Warte des Schreibenden – mit seiner spärlichen, aber natürlichen Intelligenz – ergibt das konsolidierte Zukunftsszenario im Grossen und Ganzen Sinn. Die aus heutiger Sicht am wahrscheinlichsten erscheinenden Themen werden erwähnt, was aufgrund der Funktionsweise von KI auch nicht erstaunt.

Antworten von Perplexity auf eine offene Frage zu Zukunftssignalen der Metrologie (5–10 Jahre):

Signal #	Perplexity
1	Thema Vollständig vernetzte Inline-Metrologie
	Signal Messsysteme werden direkt in Fertigungslinien integriert, liefern Echtzeitdaten und steuern Prozesse automatisch
	Effekt Digitale Zwillinge nutzen Messdaten kontinuierlich für Kalibrierung, Überwachung und vorausschauende Qualitätsregelung
2	Thema KI- und Daten-getriebene Metrologie
	Signal Einsatz von Deep-Learning-Bildverarbeitung in optischer Inspektion; Software, die Messprogramme automatisch erzeugt und Messunsicherheit datenbasiert modelliert
	Effekt Qualitätsentscheidungen basieren zunehmend auf probabilistischen, kontextabhängigen Bewertungen grosser Datensätze
3	Thema Portabel, robotergestützt und kontaktlos
	Signal Trend zu portablen 3D-Messsystemen und Handscannern direkt an der Maschine
	Effekt Metrologie-Roboter und kollaborative Messzellen führen automatisierte, wiederholgenaue Messungen durch, auch an komplexen und grossen Bauteilen
4	Thema Neue Quantensensoren
	Signal Forschungsprojekte zu quantenbasierten Normalen, die bereits jetzt als Referenzen in Metrologieinstituten getestet werden
	Effekt Quantensensoren ermöglichen Normale und Messungen mit deutlich höherer Genauigkeit und Stabilität
5	Thema Service- und Cloud-basierte Metrologie
	Signal Metrologie verlagert sich in Dienstleistungs- und Cloudmodelle: Auswertung, Protokolle und Referenzvergleiche erfolgen zunehmend remote
	Effekt Gemeinsame Datenräume sichern durchgängige Rückverfolgbarkeit und ermöglichen Prozess-Benchmarking entlang der Wertschöpfungskette

Tab. 3: Perplexity-generierte Antworten auf einen identischen Prompt; redaktionell gekürzt.

Allerdings fehlen Themen wie Medizin, Life Sciences oder Biotechnologie. Das mag damit zusammenhängen, dass in diesen Fachbereichen metrologische Fragestellungen nicht im Fokus stehen. Der Bereich der Digitalisierung scheint der KI näher zu liegen, diese Themen sind denn auch in der Übersicht stark präsent. Das Unwahrscheinliche, Zufällige aber nichtsdestotrotz Mögliche oder auch das Interdisziplinäre bleibt der KI jedoch verborgen. Nichtsdestotrotz lädt die Übersicht dazu ein, die Ausrichtung von Forschung und Innovation am METAS zu überprüfen. Ein Blick in unser Projektportfolio zeigt, dass aktuell in all den oben genannten Punkten Aktivitäten laufen. Uff, so weit, so gut, nochmals Glück gehabt! Oder handelt es sich bloss um eine selbsterfüllende Prophezeiung, da die KI für diese Aufgabe so oder so nur Quellen der Metrologie anzapft und die Schlange sich so selbst in den Schwanz beisst? ●

«The future is already here, it's just not evenly distributed.»

William Gibson

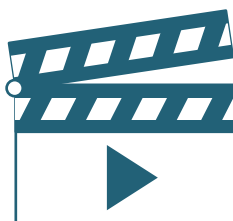
Bereit für neues Wissen?



METaspects



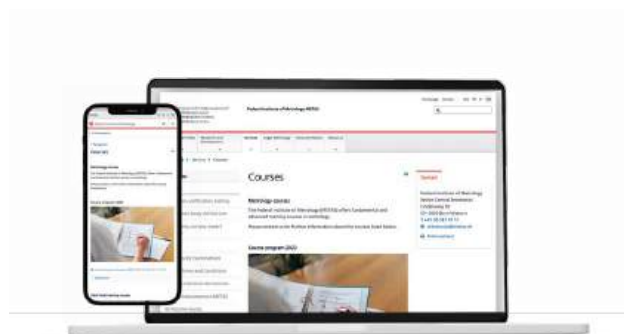
www.metas.ch
> Dokumentation
> METAS-Publikationen



Videothek



www.metas.ch
> Dokumentation
> Videos



www.metas.ch
> Dienstleistungen
> Kursangebot

Finden Sie alle METAS-Publikationen an einem zentralen Ort auf der Website des METAS. Sie profitieren von kompakt präsentiertem Wissen rund um das METAS und die Metrologie sowie von unseren regelmässig erscheinenden Periodika.