



## Metrologie für die Zukunft



**Fachorgan für Wirtschaft und Wissenschaft  
Amts- und Mitteilungsblatt der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt  
Braunschweig und Berlin**

**122. Jahrgang, Heft 4, Dezember 2012**

**Inhalt**

Metrologie für die Zukunft

- *Klaus-Dieter Sommer*: Metrologie für die nachhaltige Erzeugung, Verteilung und Nutzung von Energie 3
- *Klaus-Dieter Sommer, Petra Spitzer*: Metrologie für Umwelt und Klima 21
- *Harald Bosse*: Metrologie für neue Technologien 33
- *Herbert Janßen, Hans Koch*: Metrologie für die Gesundheit 45
- *Gerhard Ulm*: Metrologie für Sicherheit und Gefahrenschutz 57

Technologieangebote

- Metrology for advanced industrial magnetics 69
- Metrology aims at ultra-precise form characterization of any optical surface 70
- Metrology to reduce thermal effects and drift in precision engineering 71

Recht und Technik

- *Roman Schwartz*: Aktuelles aus der OIML 73
- Regeln für die Durchführung von Vergleichsmessungen von Dosimetern gemäß § 2 Abs. 3 Satz 3 der Eichordnung 78

Amtliche Bekanntmachungen (eigenes Inhaltsverzeichnis) 79

**Titelbild**

Windenergieanlagen gelten als Grundpfeiler der Energieversorgung aus regenerativen Energien. Rückgeführte Kalibrierungen und wissenschaftliche Forschung in der PTB tragen sowohl zur technischen als auch zur wirtschaftlichen Effizienz solcher Anlagen bei. (Foto: Chris Keller / bobsairport.com)

# Impressum

Die PTB-Mitteilungen sind metrologisches Fachjournal und amtliches Mitteilungsblatt der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. Als Fachjournal veröffentlichen die PTB-Mitteilungen wissenschaftliche Fachaufsätze zu metrologischen Themen aus den Arbeitsgebieten der PTB. Als amtliches Mitteilungsblatt steht die Zeitschrift in einer langen Tradition, die bis zu den Anfängen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (gegründet 1887) zurückreicht. Die PTB-Mitteilungen veröffentlichen in ihrer Rubrik „Amtliche Bekanntmachungen“ unter anderem die aktuellen Geräte-Prüfungen und -Zulassungen aus den Gebieten des Eich-, Prüfstellen- und Gesundheitswesens, des Strahlenschutzes und der Sicherheitstechnik.

## Verlag

Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Bürgermeister-Smidt-Str. 74–76,  
27568 Bremerhaven  
Postfach 10 11 10, 27511 Bremerhaven  
Internet: [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de)  
E-Mail: [info@nw-verlag.de](mailto:info@nw-verlag.de)

## Herausgeber

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB),  
Braunschweig und Berlin  
Postanschrift:  
Postfach 33 45, 38023 Braunschweig  
Lieferanschrift:  
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

## Redaktion/Layout

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, PTB  
Dr. Dr. Jens Simon (verantwortlich)  
Gisela Link  
Telefon: (05 31) 592-82 02  
Telefax: (05 31) 592-30 08  
E-Mail: [gisela.link@ptb.de](mailto:gisela.link@ptb.de)

## Leser- und Abonnement-Service

Karin Drewes  
Telefon: (04 71) 9 45 44-61  
Telefax: (04 71) 9 45 44-88  
E-Mail: [vertrieb@nw-verlag.de](mailto:vertrieb@nw-verlag.de)

## Anzeigenservice

Karin Drewes  
Telefon: (04 71) 9 45 44-21  
Telefax: (04 71) 9 45 44-77  
E-Mail: [info@nw-verlag.de](mailto:info@nw-verlag.de)

## Erscheinungsweise und Bezugspreise

Die PTB-Mitteilungen erscheinen viermal jährlich. Das Jahresabonnement kostet 55,00 Euro, das Einzelheft 16 Euro, jeweils zzgl. Versandkosten. Bezug über den Buchhandel oder den Verlag. Abbestellungen müssen spätestens drei Monate vor Ende eines Kalenderjahres schriftlich beim Verlag erfolgen.

© Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven, 2012

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieser Zeitschrift darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages vervielfältigt oder verbreitet werden. Unter dieses Verbot fällt insbesondere die gewerbliche Vervielfältigung per Kopie, die Aufnahme in elektronische Datenbanken und die Vervielfältigung auf CD-ROM und in allen anderen elektronischen Datenträgern.



## Metrologie für die nachhaltige Erzeugung, Verteilung und Nutzung von Energie

Klaus-Dieter Sommer\*

### 1 Einleitung

Die Schaffung einer sicheren, bedarfsgerechten und nachhaltigen Versorgung mit Energie, ihre intelligente Verteilung sowie die effiziente Nutzung gehören in Anbetracht der endlichen, mit vernünftigem Aufwand auswertbaren fossilen Energieressourcen und der immer kritischere Ausmaße annehmenden Kohlendioxid-Immission in die Erdatmosphäre zu den größten wissenschaftlich-technischen Herausforderungen, die die Menschheit heute und in den kommenden Jahrzehnten zu bewältigen hat. Dabei sind es vor allem vier Punkte, die die Dringlichkeit nachhaltiger Lösungen unterstreichen:

- a) Der Kohlendioxid-Ausstoß durch fossile Brennstoffe ist nach Angaben des norwegischen Zentrums für Klima- und Umweltforschung im Jahr 2010 auf nie gekannte neun Milliarden Tonnen gestiegen. Das entspricht einem Anstieg um fast sechs Prozent gegenüber dem Vorjahr. Das sogenannte Kyoto-Ziel der Begrenzung der Erderwärmung um maximal zwei Kelvin dürfte damit für Fachleute keine realistische Zielmarke mehr sein; verschiedene Klimamodelle deuten bei Beibehaltung des derzeitigen weltweiten klimapolitischen Kurses auf eine Erwärmung von bis zu +4° C zum Ende dieses Jahrhunderts hin. Viele Regionen der Welt müssen sich bereits für die kommenden Dekaden auf extreme Wetterlagen und signifikante Klimaveränderungen vorbereiten. Ein definitives Ende des Treibhausgas-Anstiegs ist vorerst nicht in Sicht: Bereits auf der Kyoto-Konferenz im Jahr 1997 (COP3-Conference of Parties) waren wichtige Industrie- und Schwellenländer nicht bereit, verbindliche Verpflichtungen einzugehen, und dieses real zwar nur begrenzt wirksame aber politisch und strategisch natürlich außerordentlich wichtige „Kyoto-Protokoll“ wird voraussichtlich im Jahr 2012 auslaufen.
- b) Spätestens seit dem Fukushima-Desaster am 11. März 2011, bei dem es infolge des Tōhoku-

Erdbebens und eines nachfolgenden Tsunamis zu Kernschmelzen in drei Reaktorblöcken, verbunden mit einer erheblichen Kontamination von Luft, Böden, Wasser- und Nahrungsmitteln kam, fehlt insbesondere in den dichtbesiedelten Industriestaaten wie Deutschland das notwendige Vertrauen in die Sicherheit der vor mehreren Jahrzehnten entwickelten nuklearen Kraftwerkstechnologie. Bessere Kernkraftwerkstechnologien stehen derzeit nicht zur Verfügung, und Neuentwicklungen finden nicht oder nur zögerlich statt.

- c) Die Anzahl der erkundeten Lagerstätten an fossilen Brennstoffen, insbesondere Erdgas und Erdöl, die mit technisch verträglichem Aufwand und wirtschaftlich akzeptablen Kosten ausgebeutet werden können, ist nach allen vorliegenden Kenntnissen in den letzten Dekaden gesunken. Die Erschließung „neuer“, sogenannter unkonventioneller fossiler Energieträger, zu denen beispielsweise Ölsande, Ölschiefer, polares Öl und Gaskondensate gehören, sowie die Förderung von fossilen Brennstoffen aus sehr tiefen Lagerstätten mittels Tiefbohrtechniken mit dem Einpressen von „Frac-Fluiden“ (Hydraulic Fracturing) sind meist sehr aufwändig und/oder mit hohen Risiken für Umwelt und Menschen verbunden.
- d) Schließlich sehen wir uns im globalen Maßstab durch den rasanten industriellen Aufstieg der Schwellenländer – insbesondere China, Brasilien, Indien und Russland – mit einem erhöhten Energieverbrauch und somit einem internationalen Wettbewerb um die begrenzt effizient zu fördernden fossilen Energiereserven konfrontiert.

### 2 Neue Ansätze und generelle Strategien

Die Konsequenzen für ein an eigenen Erdgas- und Erdölvorkommen ausgesprochen armes Land wie Deutschland, das zudem bis 2022 wegen der kollektiven Sorge um die Sicherheit der in dichtbesie-

\* Prof. Dr.-Ing. Klaus-Dieter Sommer, Abteilung „Chemische Physik und Explosionsschutz“  
E-Mail: klaus-dieter.sommer@ptb.de

delten Regionen stehenden Kernkraftwerke ganz auf diese Energiequelle verzichten will, sind relativ klar und ohne wirkliche Alternativen:

- a) Die zur Verfügung stehenden fossilen und erneuerbaren Primär-Energiequellen müssen wesentlich wirkungsvoller genutzt werden, angefangen von der Effizienz der Kraftwerke über die Verteilung und Übertragung bis zum wesentlich effizienteren Energieverbrauch in Industrie, privaten Haushalten und im Verkehr. Als Beispiel sei das sehr ehrgeizige Ziel der Bundesregierung genannt, den Energieverbrauch von Gebäuden bis zum Jahr 2050 um 80 Prozent zu senken. Das Schlagwort hier heißt Energieeinsparung. Einsparungen können sowohl durch intelligente Verbrauchsstrategien, z. B. den zeitlich gestaffelten Einsatz stromintensiver Arbeitsgänge (unterstützt durch „Smart Metering“), verbunden mit preislichen Anreizen, als auch durch neue energiesparende Bau- und Bearbeitungstechnologien (Schlagwörter: Green Production, Nachhaltiges Wohnen) erreicht werden.
- b) Unser Primärenergiemix muss signifikant zugunsten des Anteils erneuerbarer Energien, insbesondere bezüglich der Windenergie (relativ kurzfristig ausbaubar), der Sonnenenergie (in Deutschland nur begrenzt möglich) sowie des Anteils biogener Kraftstoffe ausgebaut werden. Biogene Energieträger dürfen ihre Quellen nicht im gleichen Ursprungsbereich wie die Nahrungsmittelproduktion haben, um keinen Verdrängungswettbewerb zwischen „Tank und Teller“ entstehen zu lassen. Als Rohstoffe für Energieträger kommen also nur pflanzliche Abfälle und anders nicht verwertbare Bio-Abfälle infrage. Die so produzierten Kraftstoffe werden als der zweiten Generation zugehörig bezeichnet.
- c) Ein ganz wesentlicher Punkt ist, die Energie jederzeit dort verfügbar zu haben, wo sie benötigt wird, d. h. wir brauchen eine signifikante Erhöhung der Verfügbarkeit der landes- bzw. europaweit erzeugten Energie – insbesondere der erneuerbaren Energie – am Ort des Energiebedarfs und möglichst unabhängig von der Sonneneinstrahlung und der Windstärke und dies möglichst zum Zeitpunkt des Bedarfs. Das erfordert ein hochleistungsfähiges und verlustarmes Stromnetz mit Hochspannungsgleichstromtechnik auf den langen Transporttrassen, die die Windparks im Norden mit der Industrie im Süden der Republik verbinden sowie eine intelligentere Steuerung der Energieflüsse und ihrer Verteilung (Smart Grid). Das Netz bildet das Rückgrat für das gesamte Versorgungssystem. Ohne leistungsfähiges Netz bleiben alle anderen Aktivitäten Stückwerk.
- d) Bei den wichtigsten erneuerbaren Energiearten wie Windkraft und Solarenergie handelt es sich um fluktuierende Energien, die keinesfalls jeder-

zeit verfügbar sind. Der Netzausbau muss daher zwingend um leistungsfähige Speicher ergänzt werden. Die derzeit leistungsfähigste Technologie sind Pumpspeicherwerke mit Wirkungsgraden bis nahezu 90 Prozent. Allerdings müssten ihre Kapazitäten mit Blick auf die geplanten Windkraftwerke und Solaranlagen um mindestens den Faktor 1000 vergrößert werden, wozu in Deutschland die geographischen Voraussetzungen fehlen. Europaweite Lösungen müssen also angestrebt werden.

Aktuell wird darüber hinaus die Umwandlung der überschüssigen Wind-, Solar- und Bio-Energie in Wasserstoff diskutiert, der bis zu einem Gehalt von 15 Prozent in das Erdgasnetz mit eingespeist werden könnte, dort für sehr lange Zeit gespeichert und bei Bedarf wieder in Strom gewandelt werden könnte („Power-to-gas“-Konzept).

- e) Da einerseits der Anteil des Verkehrs am Energieverbrauch bei fast 30 Prozent liegt und die von ihm ausgehende Umweltbelastung enorm ist, andererseits aber die wirtschaftliche Bedeutung des Automobilbaus für den Wirtschaftsstandort Deutschland von großer Bedeutung ist, benötigen wir ein neues Mobilitätskonzept mit den folgenden Schwerpunkten:
  - signifikante Förderung der Elektromobilität einschließlich energieeffizienter Antriebe, der mobilen Energiespeicherung (Batterien sind die entscheidenden Komponenten, die über Erfolg oder Misserfolg des E-Mobilitätskonzeptes entscheiden) sowie der Lade-Infrastruktur (Teil der *Smart Electrical Grids*, *Smart Metering*) im automobilen Individualverkehr;
  - energieeffiziente und umweltverträgliche Verbrennungsantriebe mit zunehmender Nutzung von erneuerbaren Bio-Kraftstoffen im Personen- und Gütertransport auf der Straße.

Alle vier bisher genannten Punkte erfordern neue technologische Lösungen, neue Materialien und Energieträger, neue und intelligente Versorgungskonzepte und -netze sowie, was ganz wichtig ist, ein breites, kollektives Vertrauen sowohl in die Sicherheit der neuen Konzepte, Technologien und Stoffe als auch die nachweisliche Fairness bezüglich der Kosten im Handel mit Energie sowie für notwendige Investitionen und Ausrüstungen. Das ist der Punkt, an dem die Metrologie mit ihrem Beitrag ins Spiel kommt.

Entsprechend diesen aufgestellten Forderungen sind sichere und verlässliche Informationen erforderlich über

- sicherheitsrelevante und die Prozesseffizienz bestimmende Prozessparameter und Stoffeigenschaften in der Energieerzeugung, -übertragung, -speicherung und -nutzung;
- wichtige Zustandsgrößen, die für den Betrieb,

die Auslastung sowie die mathematische Rekonstruktion der Energieversorgungsnetze erforderlich sind, einschließlich ihres zeitlichen Verlaufs und der räumlichen Verteilung;

- relevante Eigenschaften von fluiden Energieträgern, insbesondere Energiegehalt, mechanische Transporteigenschaften, Materialverträglichkeit sowie auch über Indikatoren zum Herkunftsnachweis;
- abrechnungsrelevante Energiemessdaten einschließlich ihrer Zeitreihung.

Eine besondere Bedeutung kommt der metrologisch richtigen Bestimmung von Wirkungsgraden zu, vor allem in den Bereichen Energieerzeugung (z. B. hinsichtlich der Effizienz eines Windparks oder eines bestimmten Solarzellentyps), der Energienutzung (z. B. hinsichtlich des Wirkungsgrads von Antrieben oder Heizsystemen in Gebäuden) und natürlich auch bezüglich der Energiespeicherung (z. B. Kapazität und Zustand von Batterien).

Die Bereitstellung der o. a. sicheren Informationen durch metrologisch rückführbare Messungen sind nicht nur für das Engineering und für tägliche Feldmessungen von Bedeutung, sondern bilden eine unverzichtbare Grundlage für die internationale Energieforschung, insbesondere für die Vergleichbarkeit von Forschungs- und Entwicklungsergebnissen.

### 3 Messtechnische und metrologische Herausforderungen

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die konkreten messtechnischen und metrologischen Herausforderungen an die Energiemesstechnik und die Metrologie für die Energie-Forschung, die Technologieentwicklung und die künftige nachhaltigen Energieversorgung. Er orientiert sich hinsichtlich der Gliederung an der sogenannten Energieversorgungskette, bestehend aus den folgenden Bestandteilen:

- Energie-Erzeugung* (d. h. Wandlung der primär verfügbaren Energie in eine nutzbare Form, z. B. Wandlung der chemischen Energie von Erdgas in elektrische Energie oder in Wärmeenergie)
- Energie-Transport und -Verteilung* (einschließlich notwendiger Wandlungen, z. B. zu anderen Druck- oder Spannungsebenen)
- Energie-Speicherung* beinhaltet die notwendige Wandlungen z. B. von elektrischer in chemische (Batterien) oder mechanische (Pumpspeicherwerke) Energie.
- Energieverbrauch und -einsparung* (d. h. Wandlung einer hochwertigen Energieform wie Elektroenergie oder Gas in effektive und dissipative Energie, z. B. elektrische Energie zu mechanischer Antriebsenergie und Wärme)

Diese Energiekette ist in Bild 1 graphisch dargestellt. In dieser Darstellung wurde auch der Teil *Elektro-Mobilität* mit der Transaktionsenergie und der mobilen Energiespeicherung (Batterien) subsumiert.

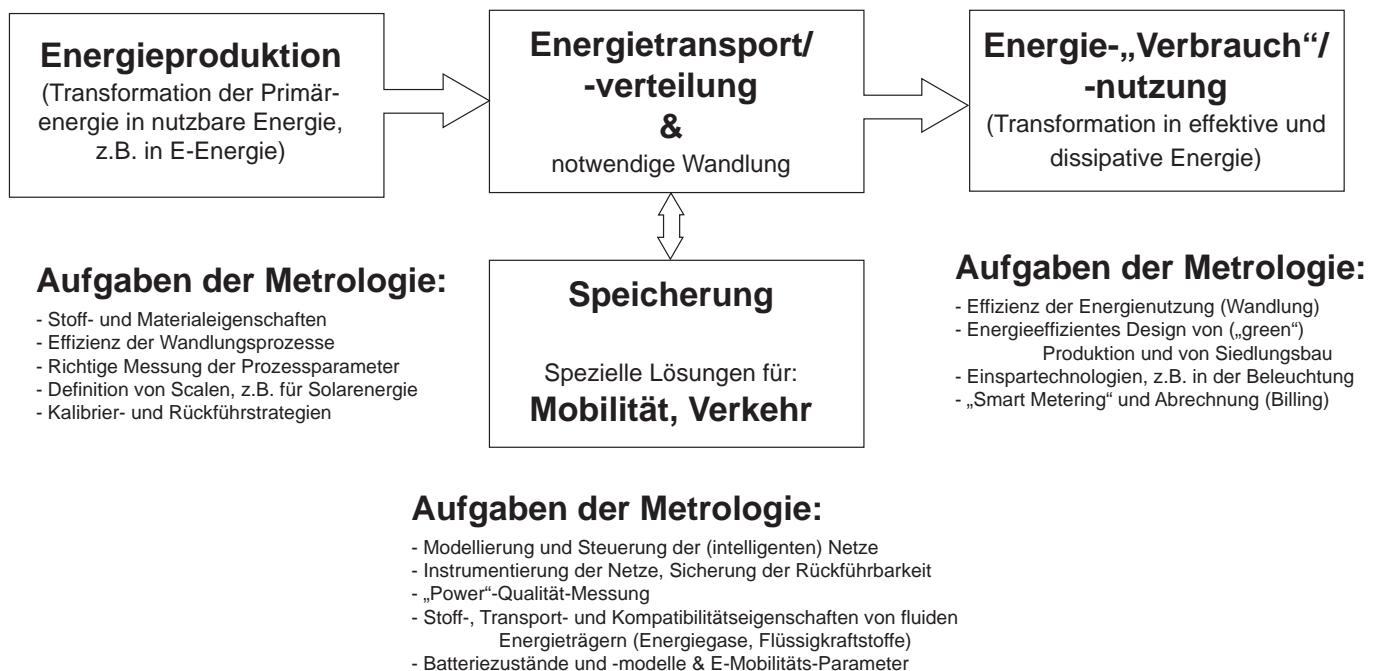


Bild 1: Illustration der Energieversorgungskette mit den relevanten Aufgaben der Metrologie und Messtechnik [5]



### 3.1 Energie-Erzeugung

Forschung und Entwicklung im Bereich der Energieerzeugung haben drei klare Hauptentwicklungsrichtungen:

- Entwicklung neuer, möglichst effizienter Technologien zur weiteren (und preiswerten) Erschließung der erneuerbaren Energien, vor allem Windenergie, Sonnenenergie und Bio-Energie für Kraftstoffe,
- deutliche Erhöhung des Wirkungsgrades konventioneller (Groß-) Kraftwerke, die noch lange Zeit das Rückgrat unserer Energieversorgung bilden werden, sowie
- signifikante Minderung des Eintrags von Treibhausgasen in die Atmosphäre und Reduktion des Abfall-Anfalls aller möglichen Art in der Energie-Großproduktion. Dabei ist es von entscheidender Bedeutung, dass keine der Maßnahmen hin zu einer mehr nachhaltigen Energieversorgung auch nur vorübergehend die Versorgungssicherheit beeinträchtigt!

*Konventionelle (Groß-)Kraftwerke:* Eine wesentliche Maßnahme mit einem signifikanten Effekt auf die Effizienz der gesamte Energieversorgung ist die Verbesserung des Wirkungsgrades der konventionellen und auch nuklearen Großkraftwerke durch Verschiebung der Arbeitspunkte hin zu höheren Temperaturen und Drücken. Als metrologische Aufgaben und Herausforderungen ergeben sich daraus die genaue Bestimmung der thermo-physikalischen Stoffeigenschaften der neu einzusetzenden, stabileren Materialien einschließlich des für die erreichbare Messunsicherheit von Strahlungstemperaturmessungen wichtigen Emissionskoeffizienten sowie eine signifikante Verringerung der Messunsicherheit. Siehe dazu auch die folgenden Abschnitte.

*Erneuerbare Energien (Wind, Sonne):* Primäre Zielsetzung ist, richtige, d. h. vergleichbare und auf nationale Normale rückführbare Messungen zu realisieren und zwar sowohl im Hinblick auf die Wirkungsgrade und die eingetragene Primärenergie als auch (meist weniger kompliziert) die abgegebene Energie. Im Bereich der Photovoltaik erfordert dies aufgrund der unterschiedlichen speziellen spektralen Verteilungen der zur Anwendung kommenden Technologie die Definition einer internationalen (spektralen) Bewertungsskala, an der derzeit neben der PTB das japanische AIST, das amerikanische NREL (und künftig auch das NIST) sowie das chinesische TIPS beteiligt sind. Im Bereich der Windenergie besteht die Herausforderung darin, das einwirkende Strömungsprofil, z. B. bis in 200 m Höhe, mit geringer Messunsicherheit vollständig messtechnisch zu erfassen, um verlässliche Aussagen über die Effizienz einzelner Anlagen und größerer Windparks treffen zu können.

*Flüssige Kraftstoffe:* Konventionelle flüssige Kraftstoffe sind üblicherweise Raffinerieprodukte des Erdöls. Die nicht zu leugnenden Umwelt-Risiken, wie sie z. B. im Jahr 2010 mit dem katastrophalen Blow-out auf der Plattform Deep-Water Horizon im Golf von Mexico sichtbar wurden, sowie die begrenzten wirtschaftlich ausbeutbaren neuen Ressourcen führen zu einem steigenden Einsatz von Bio-Kraftstoff-Gemischen mit zunehmendem Bio-Anteil. Aufgrund eines möglichen Wettbewerbs mit der Nahrungsmittelproduktion ist das nicht problemfrei. Messtechnik und Metrologie sind daher herausgefordert, nicht nur verlässlich und rückführbar Energiegehalte und Transporteigenschaften dieser Kraftstoffgemische zu bestimmen, sondern auch Methoden zum Nachweis der Herkunft zu entwickeln. Damit soll z. B. erkennbar werden, wenn aus Kostengründen ausgewachsener und unter Schutz stehender Regenwald für die Kraftstoffproduktion geopfert würde.

*Bio-Gase:* Bio-Gase werden hauptsächlich aus Bio-Abfallmasse produziert. Daher konkurrieren sie in der Regel nicht mit der Nahrungsmittelproduktion. Bio-Gas wird gewöhnlich dezentral in kleineren Anlagen erzeugt und auch dezentral eingespeist. Das bereitet einige Probleme bei der gerechten, energiegehaltorientierten Verteilung, Versorgung und Abrechnung. Folgende Parameter sind sehr genau und rückführbar auf nationale Normale zu messen:

- Methanverlust in der Herstellungsphase  
*Anmerkung: Könnte die Klimabilanz der Bio-Gas-Herstellung stark negativ beeinflussen.*
- Wirkungsgrad der Biogas-Anlage bzw. des aktuellen Herstellungsprozesses  
*Anmerkung: Hat sowohl Bedeutung für die Effizienzvorhersage in der Planungsphase als auch für den Handel mit solchen Anlagen und folgenden Förder- und Investitionsentscheidungen.*
- Energiegehalt und Zusammensetzung (Qualität) des in das Netz eingespeisten Bio-Gases.

### 3.2 Energietransport und -verteilung

*Elektro-Energie:* Im Höchstspannungsbereich für die Überbrückung sehr großer Distanzen – z. B. von den Windenergiefeldern an der Nordseeküste zu den industriellen Verarbeitungszentren im Süden der Republik – werden zurzeit völlig neue Übertragungstechnologien, insbesondere die Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HVDC), erprobt und die zugehörige, derzeit noch in den Kinderschuhen steckende Mess- und Regelungstechnik entwickelt. Dazu zählt insbesondere die auf nationale Normale rückführbare Leistungsmessung an den Übergabe-/Wandlerstationen.

Darüber hinaus erfordert die zunehmende Kombination von konventionellen und nuklearen Großkraftwerken mit der dezentral ein-

gespeisten elektrischen Energie aus Wind- und Elektrovoltaik-Kraftstationen ein intelligentes messinformationsbasiert gesteuertes Netz (*Smart-Grid*), welches auf genauen und vergleichbaren Eingangsinformationen und zuverlässigen Messwerten beruhen muss. Da in zunehmendem Maße elektrische Großantriebe – z. B. für Flughafenbelüftungen, zum Antrieb von Walzwerken oder in Schmelzhütten – mit Thyristoren oder speziellen Hochleistungs-Feldeffekttransistoren gesteuert werden, bekommt darüber hinaus die Frage der sogenannten Power-Qualität (Anteil ungradzahliger Oberwellen im Netz) gemeinsam mit ihrer messtechnischen Charakterisierung sowie ihres Einflusses auf die Qualität anderer relevanter Messungen zunehmende Wichtigkeit.

*Übertragung und Verteilung von Energie-Gasen:* Die sogenannten Energie-Gase, wie z. B. Erdgas oder Erd-Biogasgemische, werden üblicherweise in Relation zur gelieferten Energiemenge gehandelt. Aufgrund der ständig wechselnden Gasqualitäten aus ganz unterschiedlichen Quellen (Nordsee, Russland, andere Länder, norddeutsche Tiefebene, BioGase, entspannte LNG-Qualitäten ...) in Verbindung mit den üblicherweise „unter-instrumentierten“ Gas-Verteilnetzen muss die an die individuellen Abnehmer gelieferte Gasqualität mathematisch möglichst exakt rekonstruiert bzw. innerhalb eines gesetzlich vorgegebenen Genauigkeitsbandes geschätzt werden. Grundlagen dazu bilden die Kenntnisse über das Netz, seine Strömungseigenschaften, die eingespeisten Gasqualitäten und die verfügbaren Messdaten. Hochindustrialisierte Volkswirtschaften mit so engmaschigen Verteilnetzen wie Deutschland können ihre Gasverteilung ohne solche Rekonstruktionssysteme schon heute nicht mehr vollständig kontrollieren. An der PTB läuft derzeit ein Forschungsprojekt, finanziert von der DVGW, um diese Methoden weiter zu qualifizieren.

### 3.3 Energieverbrauch und -einsparung

*Privater Sektor:* Im privaten Sektor ist die technologische Entwicklung zu höherer Effizienz im Energieverbrauch gekennzeichnet durch neue energieeffiziente Gebäude- und Isolationskonzepte, spezielle häusliche Entwicklungen, z. B. für ältere Generationen, sowie – sehr wichtig – durch die Einführung neuer, fairer sowie transparenter und nachvollziehbarer Abrechnungs- und Bezahlungskonzepte für die effektiv verbrauchte Energiemenge im Rahmen des Smart-Metering. Von der Messtechnik wird erwartet, dass sie nicht nur genaue Vor-Ort-Messergebnisse liefert und deren Sicherheit und Vertrauenswürdigkeit garantiert. Die Metrologie muss auch die relevanten quantitativen Materialeigenschaften liefern, z. B. für das thermische Isolationsverhalten und die geeig-

neten, auch kostengünstigen Rückführschemen entwickeln.

*Industrieller Sektor:* Die wesentlichen Aufgaben bestehen darin, die Effizienz einschließlich der verwendeten Rohmaterialien und Halbfabrikate energetisch erfassbar und messbar zu machen (Energie-Bilanz, CO<sub>2</sub> Bilanz: sogenannte Green/Sustainable-Production). Entsprechende Modelle, Ansätze und Strategien sind zu entwickeln, mit den Rückführ-Hierarchien zu verbinden und schließlich der Industrie zur Verfügung zu stellen.

Für beide Sektoren – den privaten und den industriellen – sind neue Einspartechnologien zu entwickeln. Neben der Gebäudesanierung/-isolation steht das Thema Beleuchtung ganz oben auf der Agenda: Die Entwicklung und Serienreife neuer signifikant energiesparender Beleuchtungstechnologien, wie z. B. organischer LED-Technologien, eröffnen enorme Einsparpotenziale. Aber ihre spektrale Charakteristik und ihre subjektiv empfundene Leuchtkraft weichen signifikant von traditionellen Leuchtmitteln ab. Das erfordert neue, physiologische Ansätze zu ihrer metrologischen Bewertung.

### 3.4 Energiespeicherung und Mobilität

*Energiespeicherung im großen Maßstab:* Speziell Länder und Volkswirtschaften mit einem sehr hohen Anteil an erneuerbaren Energien sehen sich mit der Notwendigkeit konfrontiert, in großem Maßstab Elektroenergie zu speichern, z. B. mithilfe von Pumpenspeicherkraftwerken. Alternative Lösungen für Länder oder Regionen, z. B. Deutschland, die nicht über die entsprechenden geographischen Voraussetzungen verfügen, wäre die Umwandlung der vorübergehend nicht benötigten Elektroenergie aus erneuerbaren Quellen in speicherbaren Wasserstoff, der über das Erdgasnetz verteilt werden und damit auch dem Thema Brennstoffzellen neue Perspektiven geben könnte („Power-to-gas“-Konzept; siehe auch Abschn. 1) Eine effiziente und leicht zugreifbare Energiespeicherung in Verbindung mit der genauen Messung der eingespeicherten und der entnommenen Energie ist für die Zukunft unverzichtbar.

*Batterien und Brennstoffzellen:* Der wesentliche Grund für die derzeit boomenden Aktivitäten auf dem Feld der Batterie- und Brennstoffzellenforschung, speziell auf dem Gebiet der Lithium-Ionen-Batterien, ist deren beabsichtigte Nutzung im Bereich der Elektromobilität im Individualverkehr. Noch ist die erstrebte Leistungsfähigkeit nicht erreicht, sind noch nicht alle Sicherheitsfragen geklärt, und es sind noch wesentliche Grundlagenforschungen, auch hinsichtlich fundamentaler Stoffeigenschaften, thermodynamischer Zusammenhänge und Modelle zur Beurteilung des Lade- und Lebenszustandes der Batterien, zu



leisten. Darüber hinaus bilden Sicherheitsfragen einen wichtigen offenen Punkt.

*Flüssigkraftstoffe für die E-Mobilität:* Auch Elektrofahrzeuge im Individualverkehr der Zukunft werden sogenannte Range-Extender für Langstreckenfahrten benötigen, die auf konventionellen Kraftstoffen beruhen. Für rein konventionell angetriebene Fahrzeuge ergeben sich die Forderungen nach richtiger Messung der Abgase, ihrer Bestandteile und der ausgeschiedenen (Ruß-) Partikel.

*Energieversorgungsinfrastruktur für die Elektromobilität:* Das Versorgungsnetz / die Versorgungsnetze für künftige E-Mobilitätslösungen werden mit Sicherheit Teil des regionalen oder nationalen „Smart-Grid“ sein. Daher werden die metrologischen Herausforderungen auch ähnlich oder gleich sein (siehe 3.2). Darüber hinaus bestehen Anforderungen nach extrem schneller Aufladung von Autobatterien, Aufladung während des Fahrens, „fliegenden Batteriewechsel“ etc. Dazu gehören immer vertrauenswürdige On-Board-Energie-Messungen und eine faire Abrechnung der verbrauchten Transaktionsenergie, verbunden mit Fernablesung und automatisierter Gebührenerfassung.

#### 4 Laufende metrologische Projekte zum Thema Energie

Die derzeitige metrologische Forschung der PTB zum Themenbereich Energie findet [7] im Rahmen des European Metrology Research Programme (EMRP [2]) statt. In diesem Programm sind die folgenden Forschungsprojekte beheimatet:

- Characterization of Energy Gases [3, 5]
- Metrology for Energy Harvesting [3, 5]
- Metrology for Liquefied Natural Gas (LNG) [3, 5]
- Metrology for Smart Electrical Grids [3, 5]

- Metrology for Solid-State Lighting [3, 5]
- Metrology for Improved Power-Plant Efficiency [3, 5]
- Metrology for High-Voltage Direct-Current Energy Transmission [3, 5]
- Metrology for New Generation of Nuclear Power Plants [3, 5]
- Metrology for BioFuels [3, 5]
- Emerging Requirements for Measuring Pollutants from Automotive Exhaust Emissions [4, 5].

Darüber hinaus findet in der PTB eine relevante metrologische Forschung auf folgenden Gebieten statt:

- Metrology for Wind Power Stations [5]
- Model-Based Reconstruction of the Energy Content in Under-Instrumented Gas-distribution Grids (METROGAS-Projekt) [5, 6]
- International Photovoltaic Scale (AIST, NREL, PTB, TIPS) [5, 7]. ■

#### 5 Literatur

- [1] Sommer, K.-D.; Sarge, S.: The Contribution of Metrology to Energy Research and Development. Proceedings of the 2011 Workshop and Symposium of the National Conference of Standard Laboratories International, NCSLI, August 21–25, 2011, National Harbor, MD, NCSL International, Wilderness Place, CO (USA), ISBN 1-58464-066-9
- [2] [http://www.euramet.org/index.php?id=about\\_emrp](http://www.euramet.org/index.php?id=about_emrp)
- [3] [http://www.euramet.org/index.php?id=emrp\\_call\\_2009](http://www.euramet.org/index.php?id=emrp_call_2009)
- [4] [http://www.euramet.org/index.php?id=emrp\\_call\\_2010](http://www.euramet.org/index.php?id=emrp_call_2010)
- [5] [http://www.ptb.de/de/org/1/\\_index.htm](http://www.ptb.de/de/org/1/_index.htm)
- [6] <http://www.ptb.de/cms/fachabteilungen/abt3/fb-33.html>
- [7] <http://www.ptb.de/cms/fachabteilungen/abt4/fb-41.html>

## Metrologie für die Verbesserung der Effizienz konventioneller Kraftwerke

**Thomas Lederer\***, Steffen Rudtsch, Klaus Anhalt, Karsten Tawackolian, Stephan Krenek

Die Erzeugung von elektrischer und thermischer Energie in konventionellen Kraftwerken bildet das Rückgrat der europäischen Energieversorgung.

Metrologische Forschung zur Verbesserung der Kraftwerkseffizienz, deren Ergebnisse die unmittelbare Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen und die Schonung der natürlichen Ressourcen zur Folge haben, bilden deshalb eine zentrale Aufgabe der PTB. Die PTB ist hierfür in der europäischen Forschungslandschaft hervorragend vernetzt und betreibt federführend gemeinsam mit neun anderen nationalen Metrologieinstituten ein Forschungsvorhaben im Rahmen des European Metrology Research Programme.

Im Fokus des Forschungsvorhabens stehen die Temperatur- und Volumenstrom-Messtechnik, da diese als Leitgrößen für den Betrieb konventioneller Kraftwerke die ausschlaggebenden Prozessparameter darstellen.

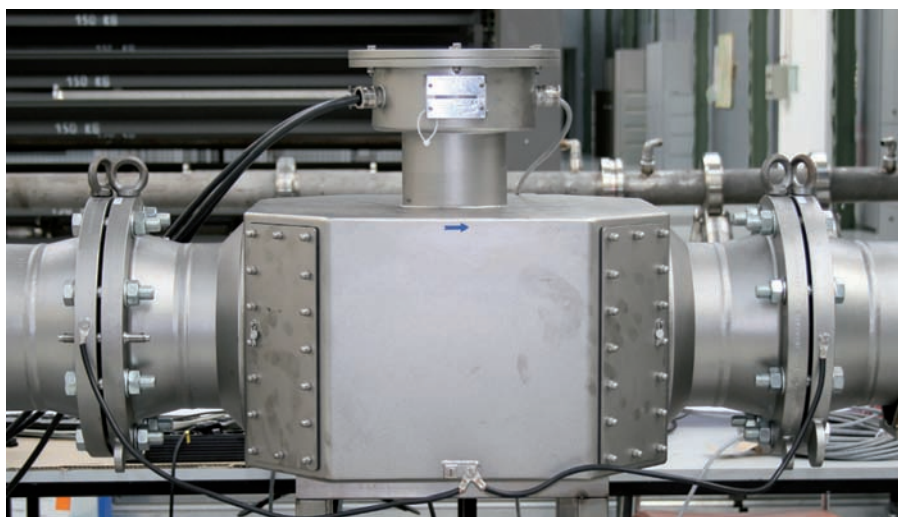
Im Bereich der Temperaturmessung werden industrielle Platinwiderstandsthermometer untersucht. Besonders oberhalb von 600 °C ist es schwierig, die Temperatur mit einem industriellen Widerstandsthermometer genau zu bestimmen. Eine höhere Betriebstemperatur verspricht grundsätzlich eine effizientere Energiegewinnung, jedoch oft verbunden mit einer höheren

Materialbeanspruchung. Die Anwendung von Nickel-Basis-Legierungen im Turbinenbereich verspricht eine Steigerung der Arbeitstemperatur auf bis zu 1300 °C. Die präzise berührungslose Temperaturmessung scheidet jedoch oft an der unzureichenden Kenntnis thermophysikalischer Materialparameter wie dem Emissionsgrad im Hochtemperaturbereich. Deshalb werden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens neue Messverfahren zur Bestimmung des spektralen Emissionsgrades oberhalb von 1000 °C entwickelt.

Der Volumenstrom im Speisewasserkreislauf eines Kraftwerks ist eine elementare Prozessgröße für den kontrollierten Betrieb. Allerdings gibt es weltweit keine Prüfanlage, um die Sensoren für die extremen Betriebsbedingungen von 300 °C und 180 bar bei hohen Volumenströmen zu kalibrieren. Im Rahmen des Projektes werden neue Strategien untersucht, um dies erstmalig zu ermöglichen.

Insgesamt werden als Resultat der Forschungsanstrengung 2–3 % Effizienzsteigerung für konventionelle Kraftwerke erwartet. Weltweit tragen beispielsweise Kohlekraftwerke zu rund 34 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei. Die Effizienzsteigerung dieser Kraftwerke kann den weltweiten CO<sub>2</sub>-Ausstoß pro Jahr um rund 600 bis 900 Millionen Tonnen vermindern. ■

\* Dr. Thomas Lederer, Fachbereich "Wärme und Vakuum"  
E-Mail: thomas.lederer@ptb.de



Kalibrierung eines Ultraschall-Durchflusssensors für den Kraftwerkseinsatz auf dem Prüfstand der PTB

## Metrologie für die Photovoltaik – Sonnige Energie messen

Stefan Winter\*

Die stetig wachsenden Investitionen im Bereich der Photovoltaik(PV)-Industrie betragen 2011 weltweit etwa 50 Mrd. Euro pro Jahr. Die Vorhersagbarkeit des wirtschaftlichen Ertrages von Solarmodulen hängt in entscheidendem Maße von der realistischen Bewertung des Wirkungsgrades ab. Kleinere Messunsicherheiten führen zu deutlich mehr ökonomisch und ökologischer Sicherheit und kleinerem Investitionsrisiko.

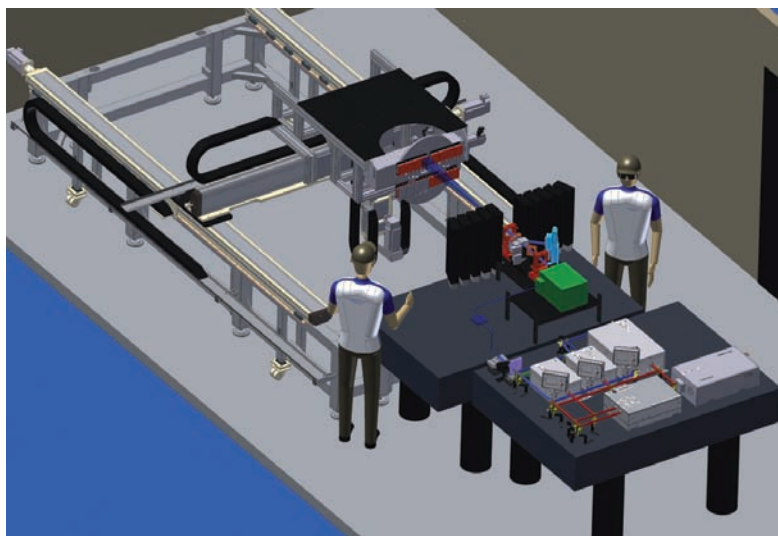
Die Messungen der deutschen PV-Industrie basieren auf Messungen der PTB, die das einzige europäische Referenz-Laboratorium ist und auch weltweit die kleinsten Messunsicherheiten bei der primären Kalibrierung von Referenzsolarzellen erreicht. Referenzsolarzellen sind ausgesuchte, speziell konfektionierte Solarzellen von typischerweise  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  empfindlicher Fläche. Solche in der PTB hochgenau kalibrierten Referenzsolarzellen stellen den Anfang einer Kalibrierkette dar, die bis zu den auf dem Dach zu montierenden Solarmodulen reicht. Das von der PTB entwickelte und international übernommene Verfahren zur

Kalibrierung von Referenzsolarzellen charakterisiert diese in Bezug auf ihr Spektralverhalten, ihre Temperaturabhängigkeit, ihre Nichtlinearität und ihre Winkelabhängigkeit.

Der Boom im Bereich der Photovoltaik spiegelt sich auch bei der Nachfrage nach hochgenauen primären Solarzellenkalibrierungen wider, die sich in den letzten Jahren verzehnfacht hat. Deshalb wird ein vollständig neu konzipierter Messplatz aufgebaut, der auf einer spektral durchstimmbaren Laserquelle anstelle von Glüh- und Xenonlampen basiert. Durch die beim laserbasierten Aufbau bis zu 1000-mal größere monochromatische Ausgangsleistung kann die Solarzelle homogener, spektral feiner aufgelöst und mit einem besseren Signal-Rausch-Verhältnis vermessen werden. So kann – wie von der Industrie gefordert – eine größere Vielfalt von Solarzellentypen und nochmals deutlich genauer kalibriert werden. Dieses Projekt wird mit Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung gefördert. ■

\* Dr. Stefan Winter,  
Arbeitsgruppe  
„Solarzellen“  
E-Mail:  
stefan.winter@ptb.de

Skizze des neuen Messplatzes, teilweise in Falschfarben. Rechts sind die Strahlengänge der verschiedenen Laser eingezeichnet. Über eine Glasfaser (blau) werden die Laserpulse zeitlich geglättet, mittels eines Monochromators (grün) noch schmalbandiger gemacht und über eine Ausgangsoptik (rot) homogen auf die Solarzelle (rot) abgebildet. Damit sich die Solarzelle im gleichen Betriebszustand wie bei Sonnenbestrahlung befindet, wird sie zusätzlich mit einem Sonnensimulator (schwarz) bestrahlt.



## Metrologie für Windkraft-Generatoren

Harald Müller\*, Helmut Többen

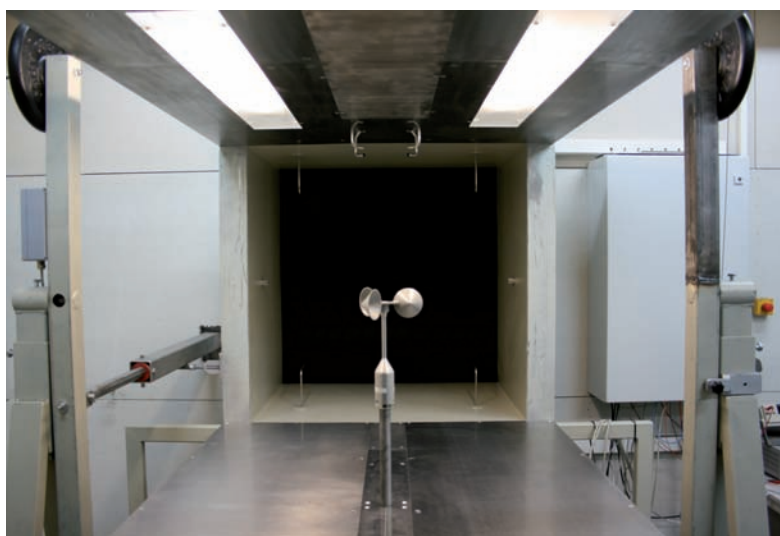
Die genaue Bestimmung der Windgeschwindigkeit ist in der Windenergiebranche sowohl für die Erstellung von Windpotentialanalysen zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Windparks als auch für die Messung der Leistungskurven von Windenergieanlagen von zentraler Bedeutung. Dabei ist die Rückführung der Windgeschwindigkeitsmessung auf die SI-Einheiten eine PTB-Aufgabe, die mittels rückwirkungsfreier laseroptischer Verfahren unter Verwendung von Windkanälen für die Darstellung und Weitergabe der Einheit „Strömungsgeschwindigkeit“ wahrgenommen wird.

Bis 2020 soll der Anteil der regenerativen Energien an der Stromversorgung Schritt für Schritt auf 30 Prozent erhöht werden. Dabei kommt der Windenergie eine Schlüsselrolle zu. Neben neuen Windparks in Nord- und Ostsee gewinnt an Land die Erschließung geeigneter Standorte sowie die Modernisierung von Windparks durch „Repowering“, den Ersatz von älteren durch weniger aber dafür leistungsstärkere neue Anlagen, zunehmend an Bedeutung. Für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Windparks werden im Vorfeld Windpotentialanalysen erstellt. Grundlage für diese Analysen sind u. a. Langzeitmessungen der

Windgeschwindigkeitsverteilung im Bereich der geplanten Anlagenstandorte. Sowohl für die Windmessung als auch für die Messung der Leistungskurven von Windenergieanlagen werden nach der IEC-Norm 61400-12-1 nur die von akkreditierten Kalibrierlaboratorien kalibrierten Schalensternanemometer anerkannt. Da die von der Windenergieanlage generierte elektrische Energie von der Windgeschwindigkeit mit der dritten Potenz abhängt, kommt der exakten Windgeschwindigkeitsmessung eine Schlüsselrolle hinsichtlich der projizierten Energieerträge zu.

Die Rückführung der Windgeschwindigkeitsmessung und die damit verbundene Sicherstellung der Vergleichbarkeit von Kalibrierergebnissen erfolgt in der PTB im Fachbereich Gase mit Hilfe von Laser-Doppler-Anemometern als Bezugs- bzw. Transfernormalen, die in Kooperation mit der Deutschen WindGuard Wind Tunnel Services GmbH, einem führenden Betreiber und Eigner großer Windkanäle für Kalibrier- und Forschungsaufgaben in der Windenergie-Branche, bereits zu einer Halbierung der Messunsicherheit für die Kalibrierung der in der Windenergie eingesetzten Schalensternanemometer geführt hat. ■

\* Dr. Harald Müller, Arbeitsgruppe „Strömungsmesstechnik“  
E-Mail: harald.mueller@ptb.de



Schalensternanemometerkalibrierung im Deutsche WindGuard Windkanal in Varel



# Energie aus der Umgebung – Rückführbare Messtechnik für Mikrogeneratoren

Torsten Funck\*, Jürgen Melcher

In unserer Umwelt existieren weitgehend ungenutzte Energiequellen in Form von Abwärme, Vibrationen und Bewegung, die durch menschliche Aktivitäten oder natürliche Energieströme gespeist werden. Diese anzuzapfen ist das Ziel neu entwickelter Mikrogeneratoren, die die Betriebsenergie z. B. für tragbare elektronische Geräte oder Sensorik an unzugänglichen Orten bereitstellen sollen. Damit kann eine drastische Reduzierung des Bedarfes an chemischen Batterien und der damit verbundenen Kosten und Entsorgungsprobleme erreicht werden.

Die Hersteller solcher Mikrogeneratoren benötigen verlässliche Messtechnik, um verschiedene Konstruktionen hinsichtlich ihrer Leistung und Effizienz vergleichen zu können, während die potenziellen Anwender zuverlässige Daten über die verschiedenen Generatoren benötigen, um den für ihren Einsatzfall optimal geeigneten auswählen zu können. Allerdings sind die verfügbaren Angaben hierzu bislang nicht immer vergleichbar, denn es fehlt für viele der hierzu notwendigen Messungen eine Rückführung auf nationale Normale. Daher wurde im September 2010 im Rahmen des EMRP unter Leitung der PTB ein internationales Projekt "Metrology for Energy Harvesting" gestartet, das rückführbare

Messtechnik hierfür entwickelt. Teilnehmer sind die nationalen Metrologie-Institute von sieben Staaten: Deutschland (PTB), Tschechische Republik (CMI), Italien (INRIM), Frankreich (LNE), Finnland (MIKES), Vereinigtes Königreich (NPL) und Slowenien (SIQ).

Abhängig von der Quelle der Umgebungsenergie sind die Ausgangssignale der betrachteten Mikrogeneratoren in vielen Fällen sehr klein, nicht sinusförmig oder sogar nicht stationär. Da dies rückführbare Messungen erheblich verkompliziert, ist das Hauptziel des Projektes die Entwicklung der notwendigen Messverfahren und einer entsprechenden Kalibrier-Infrastruktur, um die Industrie bei der Erforschung und Entwicklung von Mikrogeneratoren zu unterstützen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf thermoelektrischen und Vibrations-Generatoren mit geringen Ausgangsleistungen, wobei die Form der Anregung den in der Natur vorkommenden Bedingungen möglichst nahe kommen soll.

Nach drei Jahren Projektlaufzeit wird es in Europa eine messtechnische Infrastruktur geben, die sowohl die Charakterisierung von Mikrogeneratoren und deren Werkstoffen als auch die Kalibrierung der dazu benötigten Messgeräte ermöglicht. ■

\* Dr.-Ing. Torsten Funck, Arbeitsgruppe „Wechselstrom-Gleichstrom Transfer, Impedanz“  
E-Mail: torsten.funck@ptb.de

Eine Reduzierung des Batteriemülls würde Kosten und Umweltbelastung reduzieren. Das Projekt entwickelt Messtechnik, die es ermöglichen kann, die Einsatzfähigkeit von „Energie-Erntevorrichtungen“ (energy harvesters) so zu optimieren, dass durch diese Batterien ersetzt werden können.





## Plasmadiagnostik für die Kernfusion

Helmut Schuhmacher\*, Andreas Zimbal

Von der Kernfusion, d. h. der Verschmelzung leichter Atomkerne, erhofft man sich eine unerschöpfliche Energiequelle. Mit dem Internationalen Thermonuklearen Experimentalreaktor ITER in Frankreich, einem der größten Forschungsprojekte weltweit, soll ein wichtiger Schritt von heutigen Forschungsanlagen hin zu Anlagen für die zukünftige Energieerzeugung erfolgen.

Neutronen sind wichtige Reaktionsprodukte bei der Fusion. Durch die Messung des Neutronenflusses und seiner Energieverteilung gewinnt man Erkenntnisse zum Ablauf der Fusionsvorgänge im Plasma. Gegenüber anderen Fusionsanlagen (z. B. dem Joint European Torus, JET, in England, oder dem Fusionsexperiment Wendelstein 7-X in Greifswald) an denen sich die PTB bereits engagiert, erwartet man bei ITER eine Steigerung der Neutronenproduktion um mehrere Größenordnungen. Dies führt zu neuen Herausforderungen an die Messtechnik aber auch zu einer starken Belastung des Materials durch Strahlung. Ein Beispiel bereits gelungener Entwicklung ist das kompakte Neutronenspektrometer (etwa 5 kg) mit hoher Energieauflösung, das das derzeit für die Plasmadiagnostik eingesetzte Spektrometer (etwa 60 Tonnen) ersetzen soll.

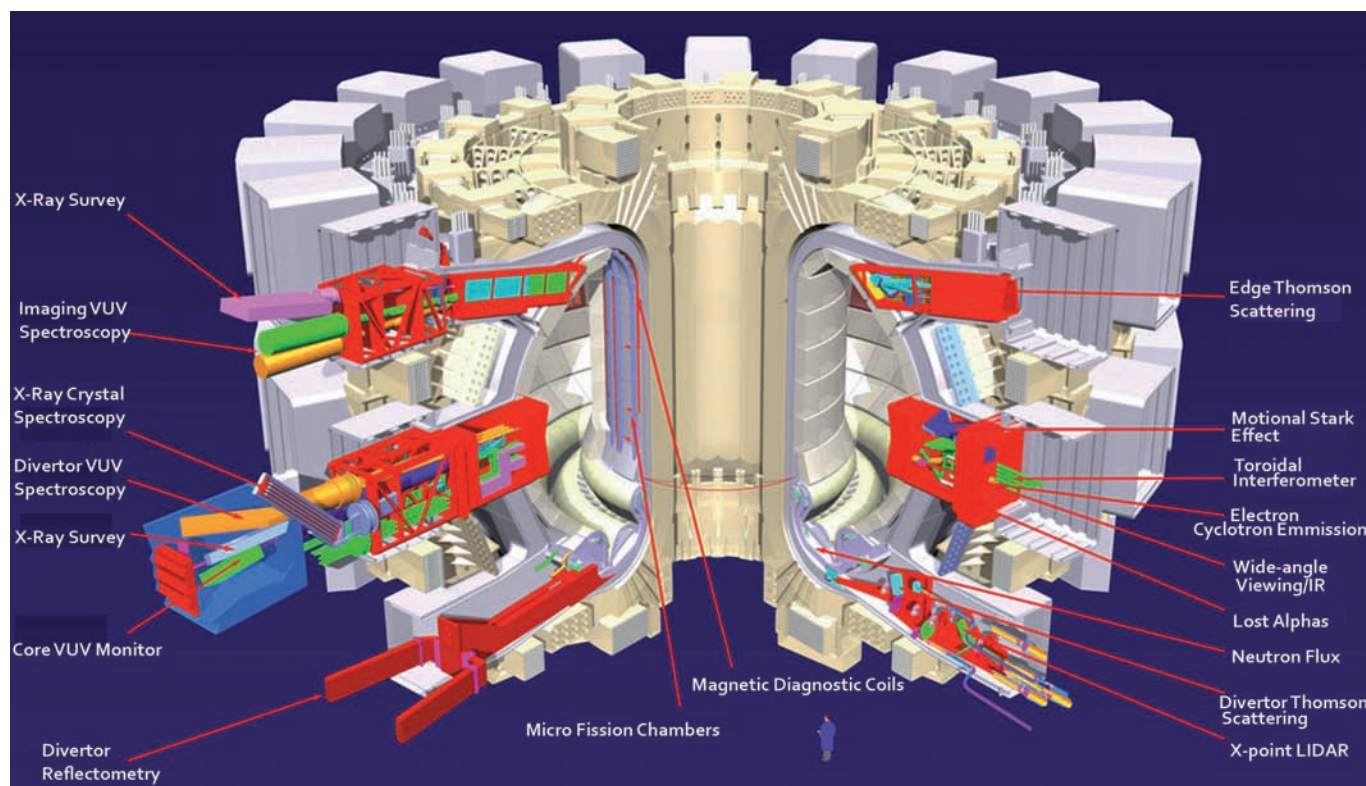
In Kooperation mit Arbeitsgruppen im Bereich der Plasmaforschung bearbeitet die PTB Projekte zur Entwicklung geeigneter Messtechnik, wobei ihre hervorragenden Einrichtungen zur Erzeugung von Neutronenstrahlung eine wichtige Rolle spielen. Die Eigenschaften der Strahlungsfelder können so gewählt werden, dass sie – bis auf die bei ITER zu erwartenden extremen Neutronenflüsse – denen bei der Kernfusion weitgehend entsprechen. Dadurch können Messverfahren unter kontrollierten Bedingungen in der PTB getestet und neue Messgeräte realitätsnah kalibriert werden.

Die wesentlichen Kooperationspartner sind IPP Garching und Greifswald, ENEA Frascati (IT) und JET Culham (UK). Die Projekte werden zum Teil durch die Europäische Kommission gefördert.

ITER wird gespickt sein mit Messgeräten zur Überwachung der unterschiedlichen physikalischen Parameter des Fusionsplasmas. ■

- [1] L. Bertalot, S. Conroy, A. Murari, M. Reginatto, H. Schuhmacher, A. Zimbal and JET - EFDA contributors: Neutron energy measurements of trace tritium plasmas with NE213 compact spectrometer at JET. 32<sup>nd</sup> EPS Conf. on Plasma Phys., 2005 ECA Vol. 29 C, P-1.078 (2005)

\* Dr. Helmut Schuhmacher, Fachbereich „Neutronenstrahlung“  
E-Mail:(helmut.schuhmacher@ptb.de)



## Flüssige Kraftstoffe – Transporteigenschaften und Energiegehalt

Henning Wolf\*, Stefan Sarge

Die Beimischung von agrotechnisch erzeugten sogenannten Biokraftstoffen zu fossilen Kraftstoffen erfordert nicht nur Modifikationen an Motoren und Einspritzsystemen, sondern für eichrechtliche, steuerrechtliche und quotenrechtliche Zwecke auch eine Neumessung der Transporteigenschaften und des Energiegehaltes der neuen Misch-Kraftstoffe.

Flüssige Kraftstoffe werden im Handel in Volumeneinheiten bemessen. Auch steuerliche Belastungen und quotenrechtliche Vorgaben werden auf eine Volumeneinheit bezogen. Um eine von der Messtemperatur unabhängige Vergleichsgröße zu schaffen, werden alle volumenbezogenen Angaben auf eine Bezugstemperatur von 15 °C umgerechnet. Für alle Kraftstoffe muss deshalb das Dichte-Temperaturverhalten bekannt sein.

Die Biokraftstoffquote ist zurzeit über den Energiegehalt der Komponenten definiert, ab 2015 wird hier das CO<sub>2</sub>-Einsparpotential verwendet.

Die PTB hat deshalb Messapparaturen zur präzisen Messung der Dichte und ihrer Temperaturabhängigkeit sowie des Energiegehaltes von Kraftstoffen aufgebaut. Die Dichte kann in einem Temperaturbereich von -25 °C bis +50 °C mit einem speziell für diesen Zweck modifizierten elektronischen Dichtemessgerät mit einer Unsi-

cherheit von 0,02 kg/m<sup>3</sup> (etwa 0,0025 %) gemessen werden. Das für die Bestimmung des Energiegehaltes von Kraftstoffen aufgebaute Verbrennungskalorimeter ermöglicht Messungen mit einer Unsicherheit von 0,2 %.

Um die europäische Harmonisierung auf diesem Gebiet zu gewährleisten, arbeitet die PTB zusammen mit 12 Partnern in einem europäischen metrologischen Verbundprojekt mit. Ziel des Projektes ist vor allem die Harmonisierung von Messverfahren zur chemischen und physikalischen Charakterisierung von Biokraftstoffen. Darüber hinaus wird die internationale Harmonisierung durch eine trilaterale Zusammenarbeit von PTB und metrologischen Staatsinstituten aus Frankreich und Brasilien mit dem Ziel, vor allem Messverfahren zu harmonisieren und Vergleichsmessungen durchzuführen, vorangetrieben.

Die PTB verlängert mit diesen Messkampagnen eine mehr als hundertjährige Tradition. Standen in den Anfängen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt die Dienstleistungen für Eich- und Finanzbehörden sowie Normungsorganisationen bei der Einführung technisch anspruchsvollerer Kraftstoffe im Vordergrund, hat heute der Umweltaspekt den höchsten Stellenwert bekommen. ■

\* Dr. Henning Wolf,  
Arbeitsgruppe „Flüssigkeitseigenschaften“  
E-Mail:  
henning.wolf@ptb.de





## Metrologie nicht-konventioneller Brenngase

**Stefan M. Sarge\***

Aufgrund ihrer relativen Umweltfreundlichkeit sollen wasserstoffreiche Brenngase im zukünftigen Energiemix einen größeren Anteil einnehmen. Dazu ist eine Verbreiterung der Rohstoffbasis notwendig. Damit geht eine Verschiebung der quantitativen und qualitativen Eigenschaften des zurzeit überwiegend genutzten Erdgases einher. Zur Sicherstellung einer korrekten und fairen Ermittlung und Abrechnung der mit dem Brenngas gelieferten Energiemenge unternimmt die PTB vielfältige Anstrengungen.

Zur Schonung der vorhandenen Erdgas-Vorräte werden zunehmend weitere Brenngasquellen erschlossen. Grubengas und Schiefergas, Methanhydrat, Gas aus fermentativen Prozessen (Biogas, Deponiegas), Synthesegas aus thermochemischer Zersetzung von Biomasse, Wasserstoff durch Elektrolyse aus überschüssigem Wind- oder Solarstrom, gegebenenfalls mit nachgeschalteter Methanisierung, sind einige Alternativen.

Neben der Lösung werkstofftechnischer, toxikologischer und hygienischer Probleme muss auch die zur quantitativen und qualitativen Bestimmung der Gaszusammensetzung verwendete messtechnische Infrastruktur des heutigen Erdgasnetzes an die neuen Gegebenheiten angepasst werden. Dieses ist geprägt durch einige wenige Einspeisestationen mit hoher Leistung, von denen ausgehend der Verbrau-

cher netzförmig versorgt wird. In Zukunft wird eine Vielzahl von Quellen geringer Leistung zusätzlich in das Gasnetz einspeisen. Die vorhandene Messinfrastruktur, die zum einen zum Steuern und Regeln der Gasflüsse verwendet wird, zum anderen auch zur Ermittlung und Abrechnung der Energiemenge dient, ist jedoch auf eine eindeutige Flussrichtung und Erdgas als Brenngas ausgelegt.

Die PTB stellt sich den resultierenden Herausforderungen in Zusammenarbeit mit Hochschulen, mittelständischen Firmen, Gasversorgern, Eichbehörden sowie europäischen Metrologieinstituten durch vielfältige Aktivitäten, u. a.

- werden die gesetzlichen Regelungen für die korrekte Mengen- und Energieermittlung angepasst,
- setzt die PTB ihre Kompetenz für die Entwicklung von Gaschromatographen zur Quantifizierung von Kohlendioxid, Schwefelwasserstoff und Wasser ein,
- werden die Grundlagen für die chemische und physikalische Charakterisierung der nicht-konventionellen Brenngase erforscht,
- werden moderne mathematische und statistische Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit bei der rechnerischen Ermittlung von Gaseigenschaften in unterinstrumentierten Netzen entwickelt. ■

\* Dr. Stefan M. Sarge,  
Arbeitsgruppe  
„Kalorische Größen“  
E-Mail:  
stefan.sarge@ptb.de



Im Sleipner-Feld in der norwegischen Nordsee fördert das Unternehmen Statoil Erdgas und speichert das anfallende CO<sub>2</sub> gleich wieder vor Ort. Foto: Dag Myrestrand / StatoilHydro

## Verflüssigtes Erdgas (LNG) – Erdgaslieferung ohne Pipeline

**Horst Bettin<sup>1</sup>, Jürgen Rauch, Markus Richter\*, Reiner Kleinrahm\*, Roland Span\***

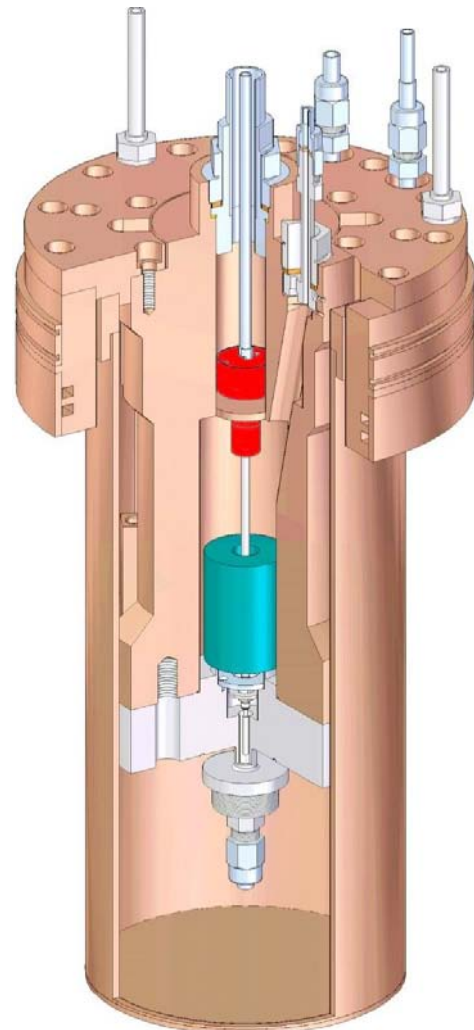
Deutschland wird heute von wenigen Lieferanten über ein weit verzweigtes Pipelinenetz mit Erdgas versorgt. Will man verstärkt am weltweiten Erdgashandel partizipieren, müssen Strukturen geschaffen werden, die die Einspeisung von verflüssigt geliefertem Erdgas (Liquefied Natural Gas – LNG) ermöglichen.

Um LNG in das Gasnetz einspeisen zu können, muss Erdgas auf der Erzeugerseite durch Abkühlung auf circa  $-161^{\circ}\text{C}$  verflüssigt, in flüssigem Zustand mit Tankschiffen transportiert und auf der Empfängerseite entladen, eventuell zwischengespeichert und wieder verdampft werden. Unter dem Aspekt eines fairen und fiskalisch einwandfreien Handels kommt der Übergabe des Erdgases zwischen den Vertragspartnern besondere Bedeutung zu – und diese erfolgt in der Regel in flüssigem Zustand.

Während für Pipelineerdgas Verfahren entwickelt wurden, die eine sehr genaue Abrechnung von Energieinhalten ermöglichen, besteht hier bei LNG noch Nachholbedarf. Ziel des von EURAMET im Rahmen des EMRP-Programms geförderten Forschungsvorhabens „Metrology for Liquefied Natural Gas“ ist es, die Messunsicherheit bei der Abrechnung von LNG auf die Hälfte zu reduzieren. Entscheidende Bedeutung hat dabei neben der Volumenstrommessung die Messung und Berechnung von LNG-Dichten. Die an der Ruhr-Universität Bochum im Aufbau befindliche Dichtemessanlage für LNG soll mit einer Unsicherheit von 0,02 % ( $k = 2$ ) in der Dichte etwa um einen Faktor zehn genauer sein als die Daten, auf denen die heute verwendeten Abrechnungsverfahren basieren. Die Rückführung auf die SI-Einheiten wird von der PTB gewährleistet. Außerdem arbeitet die PTB in dem EMRP-Projekt bei der Berechnung des Energieinhalts von LNG mit.

Zentraler Bestandteil der Dichtemessanlage ist ein magnetisch aufgehängter Senkkörper, mit dem die Dichte nach dem Archimedischen Prinzip gemessen werden kann. Von Seiten der PTB wird das Volumen des Senkkörpers in höchstmöglicher Genauigkeit und auf die SI-Einheiten rückführbar bestimmt. Die Konstruktion von Thermostat und Messzelle ermöglicht die Vermessung bei kryogenen Temperaturen siedender Gemische, ohne dass es durch Konzentrationsänderungen beim Phasenwechsel zu zusätzlichen Unsicherheiten hinsichtlich der Flüssigkeitsdichte kommt.

Kooperationspartner: VSL (coordinator), TUV NEL, PTB, LADG, FORCE, SP, JV, CMI, INRIM, Elengy, E.ON Ruhrgas AG, ENAGAS, Ruhr-Universität Bochum. ■



3D-Darstellung von Messzelle und erster Thermoststufe der neuen Dichtemessanlage. Zu erkennen sind der Senkkörper (türkis) und die Magnetschwebekupplung (rot), die den Senkkörper durch die Messzellenwand hindurch mit einer Präzisionswaage verbindet.

<sup>1</sup> Dr. Horst Bettin, Arbeitsgruppen „Thermisches Zustandsverhalten und Dichte“ und „Avogadro-Konstante“  
E-Mail: horst.bettin@ptb.de

\* Ruhr-Universität Bochum

# Smart-Grid-Metrologie

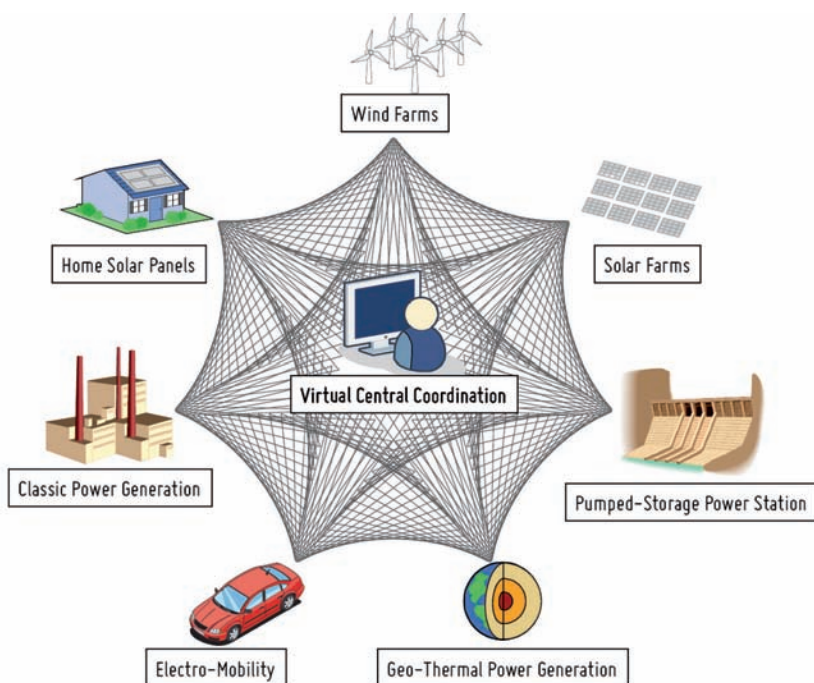
**Martin Kahmann\***

In der weit mehr als 100-jährigen Geschichte der öffentlichen Energieversorgung sind Netzstrukturen entstanden, die für eine zentral organisierte Erzeugung, Übertragung und Verteilung optimiert sind. Innovationen der vergangenen Jahrzehnte im Bereich von Kleinerzeugungsanlagen und Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) lassen es aber in heutiger Zeit sinnvoll erscheinen, die Netze so weiterzuentwickeln, dass zunehmend auch eine dezentrale, durch IKT in das Gesamtversorgungssystem integrierte Einspeisung von Energie wirtschaftlich wird.

Elektrizität aus regenerativen Energiequellen steigt mit steigender Tendenz in Deutschland einen Anteil von inzwischen etwa 13 Prozent zum Bruttostromverbrauch bei. Eine zuverlässige Rund-um-die-Uhr-Versorgung allein mit Regenerativen ist in Industriestaaten wie Deutschland nicht ohne Weiteres möglich. Um die regenerativ erzeugte Elektrizität möglichst effizient in das Gesamt-Elektrizitätsversorgungssystem zu integrieren, muss ein Informations- und Steuerungsnetzwerk aufgebaut werden, das die Energieflüsse der konventionellen Erzeugung, der regenerativen Erzeugung, der Speichernutzungen und der Verbräuche bei den Endkunden zeitlich und mengenmäßig koordiniert. Realisierungen solcher Konzepte werden heute in der Regel als Intelligente Netze oder Smart Grids

bezeichnet. Richtige Energie-Messwerte liefern in solchen Netzwerken die für die Systemstabilität entscheidenden Informationen. Richtigkeit bedeutet dabei nicht nur die richtige Messung von elektrischen Größen wie Strömen, Spannungen, Frequenzen sowie von Blind- und Wirkarbeit. Richtigkeit bedeutet hier insbesondere auch eine unverfälschte Übertragung von Messwerten vom Zähler im Versorgungsnetz hin zu den Leitstellen und Kontrollinstanzen des Informations- und Steuerungsnetzwerkes. Wegen dieser Dualität engagieren sich die PTB-Fachleute für Messgenauigkeit gemeinsam mit den PTB-Fachleuten für die Messdatensicherheit im Rahmen der nationalen Innovationsinitiative E-Energy in den relevanten Normungs- und Standardisierungsgremien von DIN und VDE sowie auf internationaler Ebene in den durch Normungsmandate der Europäischen Kommission ins Leben gerufenen Gremien wie der Smart-Grid-Coordination-Group von CEN, CENELEC und ETSI. Durch die Mitarbeit der PTB in der Normung und Standardisierung und das Sammeln von Erfahrungen aus dem eigenen, wissenschaftlichen Problemlösen qualifiziert sie sich als unabhängige metrologische Beraterin und Vermittlerin zwischen den Interessen der Netzindustrie einerseits und den energiewirtschaftspolitischen Anliegen des Staates andererseits. ■

\* Dr. Martin Kahmann, Fachbereich „Elektrische Energiemesstechnik“ E-Mail: martin.kahmann@ptb.de



Das Bild zeigt den technologiephilosophischen Ansatz der Smart Grids: Energieflüsse und Messdateninformationsflüsse werden über Vernetzung koordiniert, um bei gleichbleibender Versorgungssicherheit den Bedarf an nicht regenerativ erzeugter Elektrizität zu minimieren.



## Elektrische Energiemesstechnik

**Martin Kahmann\***

Der Handel mit Strom setzt eine geeignete Messtechnik voraus. Metrologische Infrastrukturen, innerhalb derer entsprechende Messtechnik bereitgestellt und dauerhaft verfügbar gehalten wird, entwickeln die Märkte allerdings erfahrungsgemäß nicht aus eigener Kraft. Das Arbeitsgebiet Elektrische Energiemesstechnik der PTB hat deshalb zum Ziel, die metrologischen Voraussetzungen für die richtige Messung von Elektrizität zu schaffen.

Basierend auf den tragenden regulatorischen Säulen des Gesetzes betreffend die Elektrische Maßeinheiten (GEM) von 1898 definiert das Eichgesetz auch heute noch den Auftrag der staatlich betriebenen Elektrischen Energiemesstechnik: Die erste Säule ist die Darstellung der elektrischen Einheit kW. Sie erfolgt durch ein nach dem Abtastprinzip arbeitendes Primärleistungsnormal, mit dem die Einheit kW mit einer Unsicherheit von  $5 \cdot 10^{-6}$  repräsentiert werden kann. Die zweite Säule bildet die Weitergabe der Einheit kW. Diese erfolgt durch Kalibrierung von kommerziell verfügbaren, hochgenauen Leistungsmessgeräten. Messunsicherheiten von  $5 \cdot 10^{-5}$  sind mit diesen Geräten zu

erreichen. Nutzer dieser Dienstleistung sind zum weit überwiegenden Teil die 109 staatlich anerkannten Prüfstellen für Messgeräte für Elektrizität in Deutschland. Sie verwenden die genauen Standard-Leistungsmessgeräte für die Eichung der rund 43 Millionen Elektrizitätszähler, die in Deutschland für Abrechnungszwecke eingesetzt werden. Geeicht werden dürfen die Zähler jedoch nur, wenn sie über einen gültigen Nachweis ihrer Konformität mit den Konstruktionsanforderungen des deutschen Eichrechts verfügen. Das Erbringen solcher Nachweise bildet schließlich die dritte Säule der elektrischen Energiemesstechnik. Hier sind die Kunden nationale und internationale Hersteller von Elektrizitätszählern.

Zur Messung sehr großer Energiemengen werden die Zähler mit Messwandlern kombiniert. Auch für diese stellt der Fachbereich metrologische Dienstleistungen zur Darstellung, Weitergabe und Bauartprüfung von Abrechnungsgeräten bereit. Messgröße ist hier jedoch statt der elektrischen Leistung das Messwandler-Übersetzungsverhältnis. ■

\* Dr. Martin Kahmann,  
Fachbereich  
„Elektrische Energiemesstechnik“  
E-Mail:  
martin.kahmann@  
ptb.de

Das nationale Normal für die elektrische Leistung besteht im Wesentlichen aus einem höchstgenauen Abtastmultimeter, in der PTB entwickelten und gefertigten Präzisionsstrom- und Spannungswandlern sowie je einer Quelle für Prüfstrom- und Prüfspannung. Rückführungen mit einer Unsicherheit von bis zu  $5 \cdot 10^{-6}$  sind damit möglich.



## Rückführbare Wirkungsgradmessung von elektrischen Antrieben

Frank Lienesch\*, Christian Lehrmann

Die Erhöhung des Wirkungsgrades von elektrischen Antrieben schont die Energiereserven und gilt damit als CO<sub>2</sub>-Einsparpotential, da elektrische Antriebe etwa ein Drittel der elektrischen Energie verbrauchen. Das Einsparpotential wird sich mit der bevorstehenden Elektrifizierung der Automobile noch deutlich erhöhen. Die Europäische Union hat daher zunächst Mindestwirkungsgrade für Standardasynchronmotoren formuliert, deren Einhaltung durch die Marktüberwachung sichergestellt werden muss. Basis einer funktionierenden Marktüberwachung ist die messtechnische Rückführung der Messgrößen und definierte Messverfahren.

Der Wirkungsgrad des elektrischen Antriebes ist das Verhältnis von Ausgangsleistung zu Eingangsleistung. Zur Bestimmung der Eingangsleistung sind die Messgrößen Spannung  $U$ , Strom  $I$  sowie deren Phasenwinkel  $\cos\varphi$  notwendig. Neben der reinen sinusförmigen Einspeisung müssen bei Antrieben mit einem Frequenzumrichter Frequenzen bis zu 100 kHz berücksichtigt werden.

Die Ausgangsleistung errechnet sich aus dem Drehmoment und der Drehzahl (direkte Wirkungsgradbestimmung). Alternativ können von

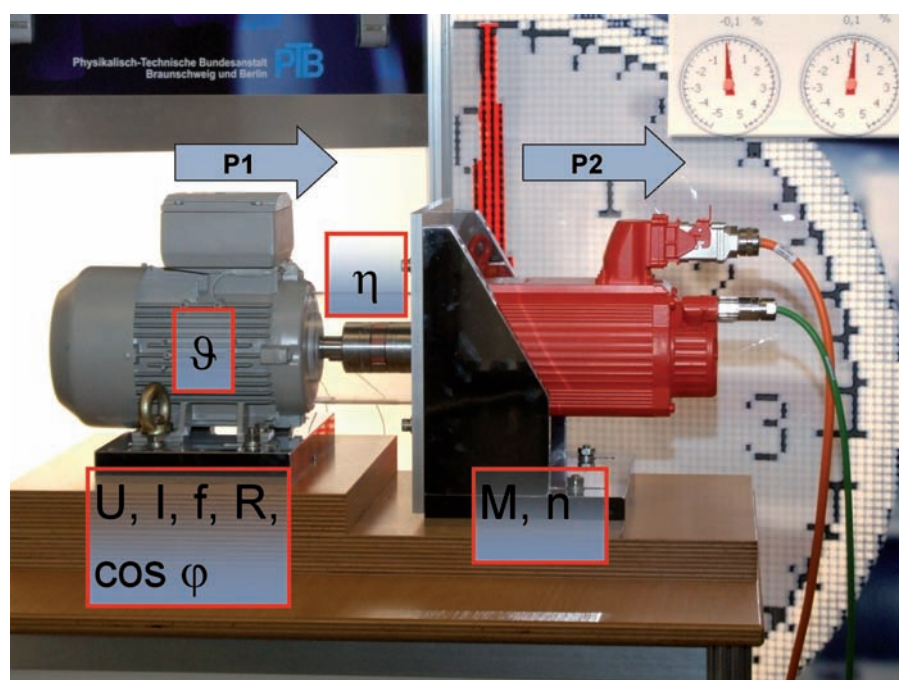
der Eingangsleistung die jeweiligen Verluste der Maschine abgezogen werden (indirekte Wirkungsgradbestimmung). Dazu zählen die Ständer-/Rotorkupferverluste, Eisen-/Reibungsverluste und die sogenannten Zusatzverluste. Beide Verfahren sind durch die Regulierung respektive die Normung beschrieben.

Für die direkte Wirkungsgradbestimmung ist die zeitsynchrone Messung der elektrischen und mechanischen Größen erforderlich. Moderne Leistungsmessgeräte „Poweranalyser“ bieten diese Option. Insbesondere bei der Rückführung der Messgröße Drehmoment sind die dynamischen Anteile wichtig.

Der Vergleich der Messergebnisse für die definierten Messverfahren entsprechend der üblichen Praxis zeigt zum Teil erhebliche Unterschiede, die für eine Bewertung der Mindestwirkungsgrade Auslegungsschwierigkeiten mit sich bringen.

Die Reduzierung der Messunsicherheit bei der Wirkungsgradmessung von elektrischen Antrieben verbessert die Optimierungsmöglichkeiten der verschiedenen Verluste innerhalb der Maschinen, um das maximale Einsparpotential zu erreichen. ■

\* Dr.-Ing.  
Frank Lienesch,  
Arbeitsgruppe „Explosionsgeschützte elektrische Antriebssysteme“  
E-Mail:  
frank.lienesch@ptb.de



Darstellung eines Motorenprüfstandes mit den wichtigen Messgrößen zur Bestimmung des Wirkungsgrades  $\eta$  als Verhältnis aus mechanischer Leistung ( $P2$ ) und elektrische Leistung ( $P1$ ).



# Metrologie für Umwelt und Klima

Klaus-Dieter Sommer\*, Petra Spitzer\*\*

## Einleitung

Der Klimawandel findet mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit bereits statt, auch in Deutschland. Auffällig sind schon heute längere Trockenperioden, stärkere Regenfälle, heftige Stürme und schneefreie Winter. Unterschiedliche Modelle zeigen, dass die Durchschnittstemperatur in Deutschland in diesem Jahrhundert um ein bis 3,5 Grad Celsius steigen wird. Die Auswirkungen des Klimawandels, wie Waldbrände, Hitzewellen und ein Anstieg des Meeresspiegels dürften also tendenziell in der Zukunft zunehmen. Die größten durch den Klimawandel bedingten klimatischen Veränderungen erwarten Klimaforscher für Südwestdeutschland, Ostdeutschland, die Alpen und die Küstenregionen.

Der vierte IPCC-Klimabericht von 2007 [1] hat klar aufgezeigt, dass die zunehmende globale Erwärmung der Atmosphäre hauptsächlich durch den Anstieg der Konzentration von Treibhausgasen aufgrund menschlicher Aktivitäten verursacht wird. Der Klimawandel könnte noch in diesem Jahrhundert katastrophale Ausmaße annehmen, wenn die Treibhausgasemissionen nicht weltweit rasch und entscheidend gesenkt werden. Im Ergebnis der 15. Klimakonferenz in Kopenhagen (COP 15) wurde 2009 als Minimal-

konsens erstmals das konkrete Ziel vereinbart, die Erderwärmung auf weniger als 2 °C im Vergleich zum vorindustriellen Niveau zu begrenzen [2]. In Kopenhagen sind die beteiligten Länder ebenfalls übereingekommen, dass die Industrieländer bis zum 31. Januar 2010 quantifizierte und landesweite Emissionsreduktionsziele für 2020 vorlegen und umsetzen.

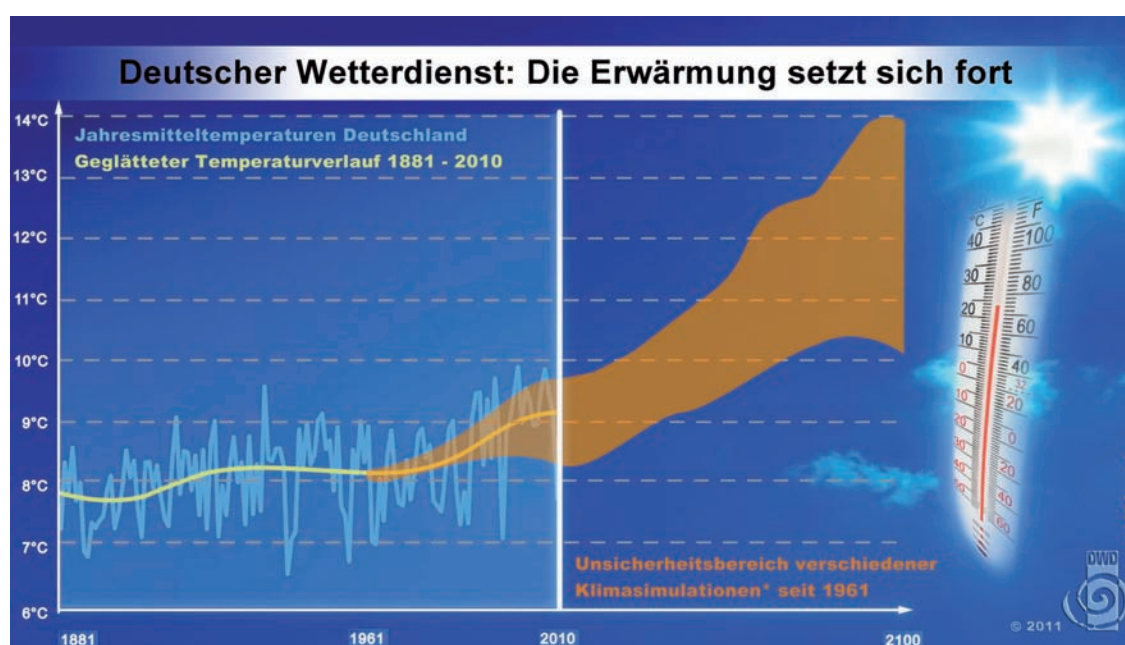
## Wie stellt sich Europa und speziell Deutschland diesen Herausforderungen?

Die EU hat sich im Dezember 2008 erstmals auf eine integrierte Strategie im Bereich Energie und Klimaschutz geeinigt. Das Paket [3] beinhaltet u. a. Rechtsvorschriften, die auf eine Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus neuen Kraftfahrzeugen und Kraftstoffen zielen. Bis 2020 sollen die Emissionen der Treibhausgase um 20 % (bzw. sogar 30 %, falls eine internationale Einigung zustande kommt) gegenüber dem Stand von 1990 gesenkt werden. Durch eine bessere Energieeffizienz soll sich der Energieverbrauch um 20 % des voraussichtlichen Niveaus von 2020 verringern, wobei 20 % des Energiebedarfs wiederum aus erneuerbaren Quellen gedeckt werden soll [4].

Um die globale Erwärmung auf + 2 °C zu begrenzen, dürfen im Durchschnitt weltweit

\* Prof. Dr.-Ing. Klaus-Dieter Sommer, Abteilung „Chemische Physik und Explosionsschutz“  
E-Mail: klaus-dieter.sommer@ptb.de

\*\* Petra Spitzer, Arbeitsgruppe „Elektrochemie“  
E-Mail: petra.spitzer@ptb.de



Jahresmitteltemperatur Deutschland – Temperaturverlauf 1881–2010, Quelle: DWD



pro Kopf nur 2,5 Tonnen CO<sub>2</sub> emittiert werden. Wer beispielsweise 15 000 km per PKW mit derzeitiger Durchschnittsemission von 170 g/km zurücklegt, hat mit 2,55 t CO<sub>2</sub> die Schwelle bereits knapp überschritten. Ein durchschnittlicher Single-Haushalt mit 2000 kWh Stromverbrauch und 10 000 kWh Gas-Heizung erzeugt rund 3,5 Tonnen allein nur mit Strom und Heizung und liegt damit bereits 40 % über der Schwelle von 2,5 t CO<sub>2</sub> [5].

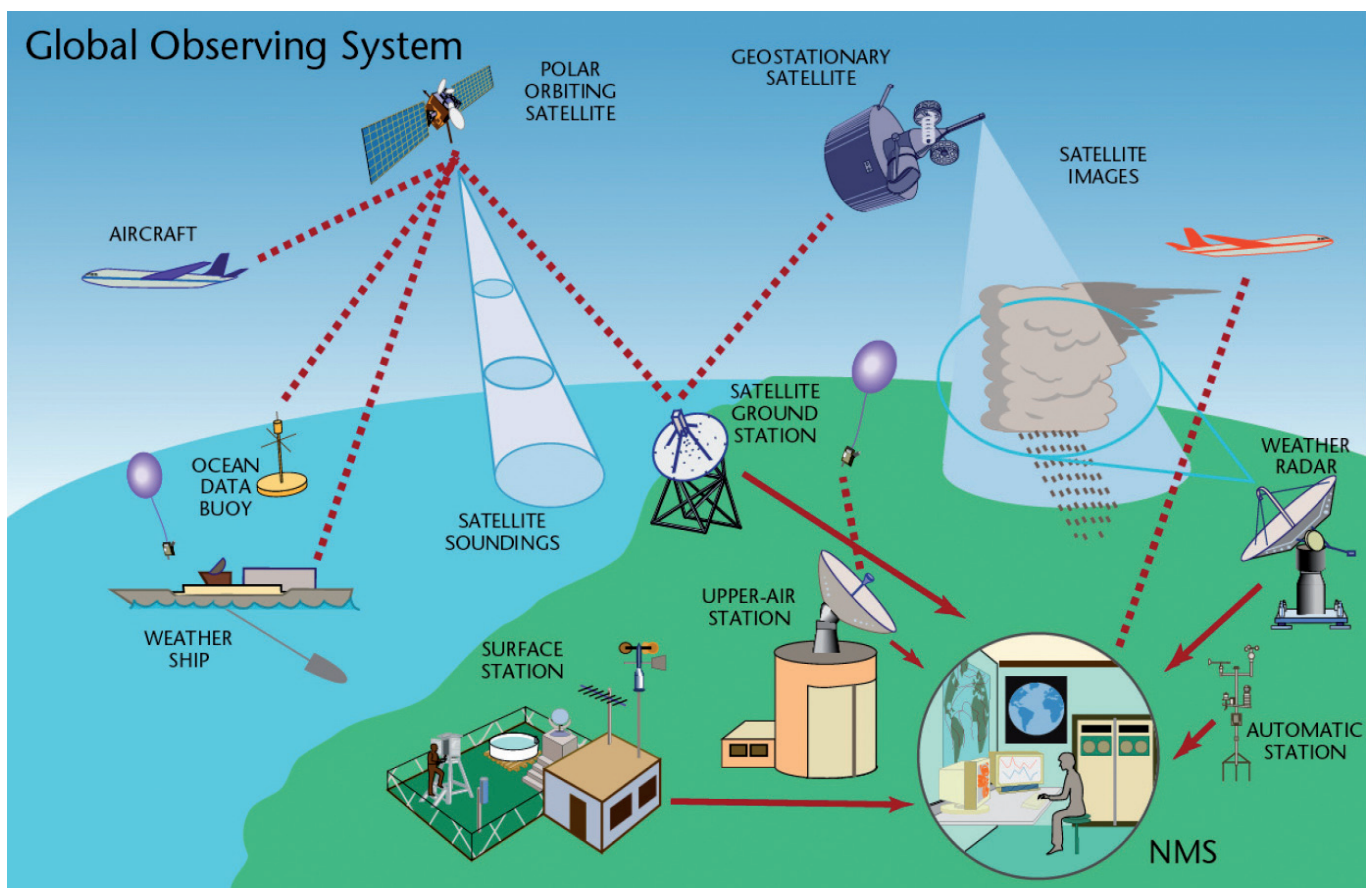
Die drastische Reduzierung von Treibhausgasemissionen um bis zu 95 % in der EU und um 50 % weltweit bis 2050 sind die wichtigsten Maßnahmen, um die Auswirkungen des Klimawandels langfristig einzudämmen und gefährliche, unumkehrbare Klimaveränderungen zu verhindern. Zur Umsetzung der europäischen Klimaschutzziele legte die EU-Kommission daher 2011 zwei weitere Maßnahmenpläne vor: den Fahrplan für die Schaffung eines wettbewerbsfähigen CO<sub>2</sub>-armen Europas bis 2050 [6] und den Europäischen Energieeffizienzplan [7], der in Deutschland durch ein 2010 beschlossenes Energiekonzept umgesetzt wird [8]. Einen zentralen Beitrag zur Minderung der Treibhausgasemissionen soll dabei der Ausbau der erneuerbaren Energien liefern.

### Beobachtungs- und Überwachungssysteme

Die EU kontrolliert mithilfe eines Überwachungssystems [9] regelmäßig die Emission und Bindung von Treibhausgasen. Um eine schrittweise Senkung der Emissionen zu erreichen, hat die EU ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten und besondere Regeln für fluoridierte Treibhausgase eingeführt [10].

Neben der Minderung des Treibhauseffektes durch Reduzierung der Treibhausgasemissionen ist die Anpassung an bereits unvermeidbare Folgen des Klimawandels die zweite Säule des Klimaschutzes. Es sind „Anpassungsmaßnahmen“ erforderlich, um den Anstieg des globalen durchschnittlichen Meeresspiegels, eine voraussichtliche Beschleunigung der Küstenerosion und zunehmend schwere wetterbedingte Naturkatastrophen zu bewältigen. Dazu hat die EU 2011 ein Weißbuch über die Anpassung an den Klimawandel angenommen [11].

Das Weißbuch fordert die Schaffung einer soliden Wissensgrundlage über die Auswirkungen und Folgen des Klimawandels für die EU. Damit über die beste Anpassungsmethode entschieden werden kann, sind der Zugang zu verlässlichen



Quelle:  
Dr. W. Zhang, WMO Presentation @ 10 year anniversary of the CIPM MRA , Paris, France 10-MRA



Daten über die wahrscheinlichen Auswirkungen des Klimawandels, die damit zusammenhängenden sozioökonomischen Aspekte, sowie die Kosten und Nutzen verschiedener Anpassungsoptionen unerlässlich.

Um eine internationale Grundlage für den Aufbau weltweiter Klimakompetenz zu schaffen, beschloss die Weltklimakonferenz 3 (WCC-3) im September 2009 den Aufbau eines globalen Rahmenwerks für Klimadienstleistungen (Global Framework for Climate Services, GFCS). Klimadienstleistungen erfordern gut funktionierende Beobachtungssysteme, eine lokale Klimaforschung und die Fähigkeit, Klimamodelle für spezielle Anwendungen zu entwickeln. Ein weiteres wichtiges Element ist die Kommunikation mit den Nutzern, um kundenorientierte Klimadienste anbieten zu können. Das Global Monitoring for Environment and Security (GMES), deutsch: Globale Umwelt- und Sicherheitsüberwachung, ist eine im Jahre 1998 gemeinsam von der EU und der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) gegründete Initiative. GMES sammelt Daten, die von Erkundungssatelliten, Raum- und Bodenstationen gewonnen werden, um ein umfassendes Bild vom Zustand der Erde zu erstellen. Das GMES-System ist der wichtigste europäische Beitrag zum Globalen Überwachungssystem für Erdbeobachtungssysteme (GEOSS). Mehr als 1000 Stationen gehören dem globalen Netz von bodennahen Klimabeobachtungsstationen an, die von vier weltweiten Organisationen (WMO, UNESCO, UN Environment Programme (UNEP) und des International Council for Science (ICSU)) betrieben werden. Über die konventionellen boden- bzw. wassergebundenen Klima- und Wetterbeobachtungsnetze fester Stationen hinaus, werden zunehmend Fernerkundungsdaten, insbesondere solche von Satellitenplattformen aus, wichtig für die Klimaüberwachung. Die Messungen der geostationären und polarumlaufenden meteorologischen Satelliten werden unter anderem vom Deutschen Wetterdienst zu geophysikalischen Daten des Energie- und Wasserhaushaltes der Atmosphäre aufbereitet und zu Zeitreihen aufgebaut. Einen Überblick über laufende und geplante nationale GMES-Vorhaben wird die Datenbank nationaler GMES-Projekte bieten, die sich seit 2010 im Aufbau befindet [12]. Europaweit soll damit auch die Zusammenarbeit im Katastrophenfall sowie bei Hochwasser oder extremer Trockenheit verbessert werden.

## Metrologische Zielsetzungen

Die PTB, in Zusammenarbeit mit den anderen metrologischen Instituten in Europa und weltweit, ist gefragt, die metrologischen Grundlagen zu schaffen, damit die Beobachtungssysteme über sehr lange, klimarelevante Zeiträume vergleichbare lokale und globale Klimadaten liefern. Für die Modellierung des Klimas sowie zur Entwicklung von Prognosen und Vorhersagen sind zuverlässige Eingangsdaten mit bekannter Messunsicherheit unerlässlich. Das gilt auch für die Bewertung der Ergebnisse von Klimaprognosen, die die Basis von politischen und wirtschaftlichen Entscheidungen bilden. Dazu ist es erforderlich, sowohl mit den Betreibern der Beobachtungseinrichtungen, als auch mit den metrologischen Partnerinstituten, Forschungseinrichtungen und Standardisierungsorganisationen eng zusammenzuarbeiten.

Grundsätzliche Zielsetzung der klimabezogenen metrologischen Forschung ist die Schaffung von metrologischer Rückführbarkeit und Vergleichbarkeit der Mess- und Beobachtungsergebnisse der für die Erd- und Klimabeobachtung wichtigsten Messgrößen. Dies sind die von der Meteorologie identifizierten GCOS Essential Climate Variables (ECV). Sie sind unterteilt nach in-situ und satellitengestützten Beobachtungen und gegliedert nach den Beobachtungssphären Land, Ozean und Atmosphäre (über Land, Ozean und Eis); die untenstehende Tabelle gibt einen Überblick über die ECVs. Über eine GOSIC-GCOS Media-Wiki-Website werden aktuelle Informationen über die Messung und die Relevanz der ECVs kommuniziert und gegebenenfalls neue ECVs identifiziert [13].

Um aus der Vielzahl der ECVs die Messgrößen zu identifizieren, für die die Herstellung der metrologischen Rückführbarkeit am dringlichsten ist und generell die Zusammenarbeit von Metrologie und Meteorologie auf eine formale Basis zu stellen, organisierte die Weltwetterorganisation (World Meteorological Organisation, WMO) zusammen mit dem International Bureau for Weights and Measures (BIPM) 2010 den „WMO-BIPM Workshop on Measurement Challenges for Global Observation Systems for Climate Change Monitoring: Traceability, Stability and Uncertainty“. Während des Workshops wurden von den Teilnehmern die messtechnischen Fragestellungen herausgearbeitet, die zu ihrer Bearbeitung dringender metrologischer Unterstützung bedürfen, dazu gehören die in-situ- und satellitengestützte Erd- und Ozeanbeobachtung. Die Nationalen Metrologieinstitute (NMIs) wurden aufgefordert, in ihren Zukunftsstrategien die Erfordernisse der Klimaforschung zu berücksichtigen. Am 1. April 2010 unterzeichnete die WMO eine gemeinsame Vereinbarung (Mutual Recognition Arrangement, MRA) mit dem BIPM [14].

**Tabelle:**

Übersicht über die GCOS Essential Climate Variables (ECV), die die relevanten Messgrößen für die metrologische Forschung in der Erd- und Klimabeobachtung bilden. Quelle: GOSIC - Global Observation Systems Information Center (<http://gosis.org/ios/MATRICES/ECV/ecv-matrix.htm>)

ATMOSPHERIC (over Land, Sea & Ice)	OCEANIC	TERRESTRIAL
Surface	Surface	
	Carbon Dioxide Partial Pressure	Water Use
Surface Air Temperature	Current	Ground Water
Surface Precipitation	Ocean Acidity	Lakes
Surface Radiation Budget	Ocean Color	Snow Cover
Water Vapour (Surface humidity)		Glacier and Ice Caps
Near-Surface Wind Speed and Direction	Sea Ice	Permafrost
Upper-Air	Sea Level	Albedo
Cloud Properties	Sea State	Land Cover (including Vegetation Type)
Earth Radiation Budget (including Solar Irradiance)	Sea Surface Salinity (SSS)	Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation (FAPAR)
Temperature	Sea Surface Temperature (SST)	Leaf Area Index (LAI)
Water Vapor	Sub-Surface	Above Ground Biomass
Wind Speed and Direction	Carbon	Fire Disturbance
Composition	Current	Soil Moisture
Aerosols Properties	Nutrients	Soil Carbon
Carbon Dioxide	Ocean Acidity	Ice Sheets
Methane and other Long-Lived Green House Gases	Oxygen	
Ozone	Salinity	
Precursors (supporting the Aerosols and Ozone ECVs)	Temperature	
	Tracers	Tracers
	Global Ocean Heat Content	

Die große strategische Bedeutung einer verlässlichen Datenbasis für die Umwelt- und Klimaforschung in Europa spiegelt sich auch darin wider, dass „Umwelt“ ein Themenschwerpunkt des europäischen Metrologie-Forschungsprogramms (EMRP) ist. Die Projekte richten sich einerseits auf lokale Umweltaspekte aus, wie die Reinheit von Wasser und Autoabgasen. Andererseits beinhalten sie Themen globaler Natur, die darauf ausgerichtet sind, Prozesse des globalen Klimawandels besser zu erfassen und zu verstehen und die Folgeerscheinungen zu mindern.

Die PTB ist z. T. federführend an allen Projekten des EMRP-Themenbereiches Umwelt maßgeblich beteiligt. Die aktuellen Forschungsprojekte befassen sich sowohl mit lokalen Umweltaspekten wie:

- chemische Schadstoffe in der Luft
- vollständige Erfassung der Schadstoffe von Autoabgasen
- Sicherstellung der Einhaltung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie
- sichere Entsorgung radioaktiver Abfälle

als auch mit globalen metrologischen Fragestellungen:

- Verbesserte Erfassung der UV-Strahlung in der Atmosphäre
- Kalibrierung satellitengestützter Spektralradiometer
- Salinität und Übersäuerung der Ozeane
- Spektrale Referenzdaten – die Basis für die Überwachung der Zusammensetzung der Atmosphäre
- Metrologie für die Meteorologie.

Im Rahmen des EMRP-Themenschwerpunktes „Umwelt“ wird gezielt an der Verbesserung der Qualität der Datenbasis für politische Entscheidungsprozesse, für die Erarbeitung neuer Richtlinien und die Überwachung der Einhaltung von Richtlinien im Umweltbereich gearbeitet. Ziel ist es, eine metrologische Infrastruktur zu schaffen, die nationale wie internationale Forschungsinitiativen in der Erd- und Klimabeobachtung und sichere politische Entscheidungen im Umweltbereich stützt. [15] ■



Um die Zusammenarbeit von Metrologie und Meteorologie auf eine formale Basis zu stellen, organisierte die Weltwetterorganisation (WMO) zusammen mit dem International Bureau for Weights and Measures (BIPM) 2010 einen gemeinsamen Workshop, in dem die Nationalen Metrologieinstitute aufgefordert wurden, in ihren Zukunftsstrategien die Erfordernisse der Klimaforschung zu berücksichtigen. Am 1. April 2010 unterzeichneten beide Organisationen dazu eine gemeinsame Vereinbarung.

Von links nach rechts: Len Barrie (WMO), Andrew Wallard (BIPM), Michel Jarraud (WMO), Ernst Göbel (CIPM) und Wenjie Zhang (WMO) bei der Unterzeichnung des Mutual Recognition Arrangement 2010 beim BIPM.

## Literatur

- [1] <http://www.ipcc.ch/>
- [2] [http://www.deutsches-klima-konsortium.de/fileadmin/user\\_upload/2010\\_Downloads/091218\\_Copenhagen\\_Accord\\_-\\_dt.pdf](http://www.deutsches-klima-konsortium.de/fileadmin/user_upload/2010_Downloads/091218_Copenhagen_Accord_-_dt.pdf)
- [3] <http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/09/628&format=HTML&aged=0&language=DE&guiLanguage=en>
- [4] [http://europa.eu/legislation\\_summaries/environment/tackling\\_climate\\_change/index\\_de.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/environment/tackling_climate_change/index_de.htm)
- [5] <http://www.agenda21-treffpunkt.de/daten/treibhausgase.htm>
- [6] [http://ec.europa.eu/clima/policies/roadmap/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/roadmap/index_en.htm)
- [7] <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0109:FIN:DE:PDF>
- [8] [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/energiekonzept\\_bundesregierung.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/energiekonzept_bundesregierung.pdf)
- [9] Entscheidung Nr. 280/2004/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Februar 2004 über ein System zur Überwachung der Treibhausgasemissionen in der Gemeinschaft und zur Umsetzung des Kyoto-Protokolls
- [10] <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:173:0013:0013:DE:PDF>
- [11] <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2009:0147:FIN:DE:PDF>
- [12] <http://www.d-gmes.de/gmes-massnahmenprogramm>
- [13] <http://dialspace.dial.pipex.com/prod/dialspace/town/estate/gtp89/cmug/ecv.html>
- [14] [http://www.bipm.org/en/events/wmo-bipm\\_workshop/signature\\_cipm\\_mra.html](http://www.bipm.org/en/events/wmo-bipm_workshop/signature_cipm_mra.html)
- [15] <http://www.ptb.de/cms/en/rmrp.html>

# Spektrale Referenzdaten für die Atmosphärenforschung und -beobachtung

Volker Ebert\*, Olav Werhahn

## Eine zentrale europäische molekülspektroskopische Infrastruktur in der PTB

Treibhauseffekt, Klimaerwärmung und Luftverschmutzung – diese Themen sind der Antrieb, Messtechniken zu entwickeln und zu verbessern, die es erlauben, Schadstoffe, Treibhausgase und Umweltgifte in der Luft zu überwachen und zu quantifizieren. Die Infrarotspektroskopie bietet dazu eine Vielzahl von Techniken, die auf der Kenntnis von molekularen Spektralparametern beruhen. Spektralparameter wie beispielsweise Linienstärken oder Druckverbreiterungs-Koeffizienten sind erforderlich, um die spektrale Signatur der Atmosphäre zu modellieren und Fernerkundungsdaten entsprechender Messinstrumente am Boden, auf Satelliten, Ballons oder Flugzeugen zu quantifizieren.

Spektralparameter sind von essentieller Bedeutung, um die zeitliche Entwicklung der Erdatmosphäre, sowie deren Strahlungs- bzw. Wärmehaushalt zu beobachten, zu quantifizieren und vorherzusagen. Allerdings besteht ein prägnanter Mangel an Liniendaten hoher metrologischer Qualität. Die PTB führt, um dieses Defizit anzugehen und eine Lösungsmöglichkeit aufzuzeigen, eine europäische Forschergruppe an, die sich mit dem Aufbau der ersten europäischen metrologischen Infrastruktur zur Messung rückführbarer spektraler Referenzdaten befasst.

Im Projekt wird das europäische Zentrallabor in der PTB aufgebaut, das zur Messung der Spektralparameter dient. Die PTB beteiligt sich in der Arbeitsgruppe 3.22 (Metrologische Molekülspektroskopie) maßgeblich am Aufbau eines höchstauflösenden ( $\Delta\nu = 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ ) Fourier-Transform-Infrarotspektrometers für den Spektralbereich vom Sichtbaren bis zum Mittelinfrarot. Zur Qualitätssicherung werden parallel standardisierte Messprotokolle entwickelt und validiert, um alle Messergebnisse in der gleichen, quantifizierbaren Qualität bereitzustellen. Die gemessenen Spektralparameter werden Grundstein für eine zukünftige metrologische Datenbank, die dann z. B. für die sogenannte kalibrierfreie Laserspektrometrie [1] zur quantitativen Gasanalyse [2], genutzt werden kann (vgl. folgende Seite). ■

## Literatur

- [1] V. Ebert, J. Wolfrum: Absorption spectroscopy. In: Optical Measurements – Techniques and Applications, Heat and Mass Transfer p. 227, Springer, Berlin 2001
- [2] O. Werhahn, P. Ulbig (Hrsg.): Rückführbarkeit in der spektrometrischen Gasanalytik. In: 226. PTB-Seminar, 2007. Braunschweig: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, ISBN 978-3-86509-651-7

\* Prof. Dr. Volker Ebert, Fachbereich „Gasanalytik und Zustandsverhalten“ E-Mail: volker.ebert@ptb.de

Zentrallabor der europäischen Spektralparameter-Infrastruktur in der PTB: Fourier-Transform-Infrarotspektrometer (Bruker IFS-125) mit einer spektralen Auflösung von  $\Delta\nu = 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$





## Rückführbare Messung von Luftverunreinigungen

Olav Werhahn\*, Volker Ebert

### Messung dicker Luft braucht präzise dünne Luft

Die rückführbare Messung von Verunreinigungen in der Luft erfordert in zunehmendem Maße die Kooperation von Metrologen, Messstellen und Gesetzgebern. Dies ist Ausdruck eines gewachsenen Umweltgedankens in der Gesetzgebung sowie der besonderen Wertigkeit des Gesundheitsschutzes in Europa. Beides verlangt eine steigende Sensitivität der Messungen, um die Grenzwerte von Luftschadstoffen, wie z. B. Ozon oder NO<sub>x</sub>, messbar zu machen. Die PTB arbeitet mit 12 europäischen Metrologieinstituten zusammen, um die Luftschadstoffmetrologie voranzubringen. Neben der PTB sind auf deutscher Seite auch das Umweltbundesamt sowie die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung beteiligt.

Im Projekt werden die Herstellung und Quantifizierung von Referenzgasen für Außen- und Innenluftmessungen bearbeitet sowie besondere, miniaturisierte Sensoren. Die Ergebnisse werden in die Neubearbeitung und -ausgestaltung der EU-Direktive 2008/50/EC sowie zur Emissionszertifizierung von Produkten zum innerhäuslichen Gebrauch („Blauer Engel“) beitragen.

Windkraftanlagen vor dem Kohlekraftwerk Mehrum

Die PTB-Arbeitsgruppe 3.22 „Metrologische Molekülspektroskopie“ arbeitet an der Charakterisierung sogenannter Nullgase. Ein Nullgas ist z. B. ein Luftgemisch mit exakt bekannten Bestandteilen aus Sauerstoff, Stickstoff und Kohlenstoffdioxid, in dem die in der Außenluft vorkommenden Verunreinigungen weit unterhalb der in der realen Luft zu messenden Konzentrationen liegen. Zertifizierte Nullgase werden in der Luftmessung vorgeschrieben, um die Messgeräte zu kalibrieren. Ziel der PTB ist es, durch Kombination etablierter metrologischer Konzepte der laserspektrometrischen Gasanalytik (vgl. PTB-Mitteilungen 115 (2005), Heft 4, S. 305ff) mehrere Inhaltsstoffe gleichzeitig zu quantifizieren. Für die in der PTB eingesetzte Technik ist zudem die genaue Kenntnis von spektralen Referenzdaten der zu messenden Spezies entscheidend (vgl. Beispiel 1, vorhergehende Seite). Diese werden ebenfalls in der Arbeitsgruppe gemessen. Bei stetig sinkenden Grenzwerten wird die Herstellung von Nullgasen zunehmend zu einem Problem. Eine präzise Zertifizierung, d. h. Herstellung und Quantifizierung der Zusammensetzung von Nullgas, ist für Luftschadstoffmessungen von immenser Bedeutung, denn nahezu alle in den Umweltmessstellen eingesetzten Geräte müssen mit Nullgas kalibriert werden. Zertifizierungsprotokolle von metrologischen Instituten sind deshalb gefragt. ■

\* Dr. Olav Werhahn,  
Arbeitsgruppe  
„Metrologische Molekülspektroskopie“  
E-Mail:  
olav.werhahn@  
ptb.de





## Europaweites Forschungsprojekt für saubere Luft

**Martin Thedens\*, Volker Ebert**

Sie können Lungenkrebs und andere schwere Erkrankungen verursachen: die winzigen Rußpartikel aus den Abgasen von der stetig zunehmenden Anzahl von Dieselfahrzeugen. Um dennoch die Gesundheitsbelastung durch Rußpartikel gering zu halten, wurden die Grenzwerte für Dieselfuhr Schritt für Schritt drastisch gesenkt, von 180 mg/km (EURO 1, 1993) bis hin zu 5 mg/km in der EURO-Norm 5. In dieser Norm wird nicht mehr nur die Massen-Konzentration der Rußpartikel, sondern auch deren Anzahl betrachtet. Dadurch berücksichtigt man neuere Ergebnisse hinsichtlich der gesundheitlichen Folgen bei der Inkorporation von Rußpartikeln. Für die Überwachung der Rußpartikelanzahlemission müssen Messverfahren optimiert und entsprechende Messgeräte zugelassen werden. Um das gesamte Messsystem von Zulassungsprüfungen über Kalibrierungen bis hin zu den regelmäßigen Abgasüberprüfungen an die neuen Vorgaben anzupassen, wurde im letzten Jahr ein europaweites Projekt gestartet. Unter Federführung der PTB arbeiten darin mehrere nationale Metrologieinstitute mit Kooperationspartnern aus der Industrie zusammen. Neben dem Dieselfuhr widmet es sich auch zwei weiteren gesundheitlich problematischen Stoffen, die die Luft verschmutzen: kleinste Abrieb-

teilchen aus Katalysatoren aus Platin und anderen Platingruppenelementen sowie jenen Quecksilberverbindungen, die bei der Verbrennung von fossilen Energieträgern in Kraftwerken entstehen.

Das auf drei Jahre angelegte Projekt hat zum Ziel, die einzelnen Lösungsansätze zu vergleichen, Messgeräte weiterzuentwickeln und sich um eine korrekte Rückführbarkeit von Messergebnissen zu kümmern – also auf allen Gebieten die Messverfahren zu verbessern. Dazu sollen international abgestimmte Normalverfahren für die Teilchenzahl (statt wie bisher ihrer Masse) entwickelt werden, die dann der Kalibrierung und Zulassung von Messgeräten dienen werden.

Welche Bedeutung das Thema auch für die Wirtschaft hat, zeigt die große Anzahl an Partnern aus der Reihe der Messgerätehersteller und aus der Automobilindustrie. Auch die beiden anderen Themen bieten Herausforderungen für die Messtechnik. Bei den sogenannten Platingruppenelementen (Platin, Palladium und Rhodium) entweichen diese als „Abrieb“ aus Katalysatoren in die Luft und stellen ein gesundheitliches Problem dar. Um dies besser einschätzen zu können, muss man erst einmal genauer wissen, um welche Mengen es sich überhaupt handelt. Dasselbe Problem stellt sich beim Quecksilber. ■

\* Dr. Martin Thedens,  
Fachbereich  
„Gasanalytik und  
Zustandsverhalten“  
E-Mail:  
martin.thedens@  
ptb.de



Bei der Abgasuntersuchung für Dieselfahrzeuge sollen in Zukunft Rußsensoren oder Partikelzähler eingesetzt werden. (Foto: Joint Research Centre)



Bei der regelmäßigen Abgasuntersuchung wird auch der Anteil an Rußpartikeln bestimmt. (Foto: Joint Research Centre)

## Metrologie für die Umsetzung der EU-Wasser-Rahmenrichtlinie

Detlef Schiel\*

Organische Zinn- und Quecksilberverbindungen, anorganische Cadmiumverbindungen und bromierte Flammschutzmittel sind chemische Stoffe, die in jüngster Vergangenheit immer wieder in die Schlagzeilen der Presse geraten sind. Ihr Gefährdungspotenzial für die Umwelt ist derartig hoch, dass für diese Stoffe in der EU-Wasser-Rahmenrichtlinie (WRRL-2000/60/EG) extrem niedrige Grenzwerte festgelegt wurden und außerdem nur miteinander vergleichbare, also rückgeführte Messergebnisse zur Überwachung der Einhaltung dieser Grenzwerte herangezogen werden dürfen. Um die Umsetzung dieser Forderung zu unterstützen, hat die PTB ein europäisches Forschungsprojekt initiiert, in dem gezeigt wurde, wie die dafür erforderlichen rückgeführten Matrixreferenzmaterialien effizient, nachhaltig und EU-weit bereitgestellt werden können [1].

Zum Anschluss aller chemisch-analytischen Laboratorien in der EU, die Messungen im Zusammenhang mit der WRRL durchführen wollen, sind entsprechende rückgeführte Referenzmaterialien insbesondere für die Validierung der Messverfahren erforderlich, aber leider kaum erhältlich. In dem von der PTB koordinierten EURAMET-Projekt konnte in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), dem französischen Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) und dem Institute for Reference Materials and Measurements (IRMM) der EU am Beispiel der toxischen Schwermetalle Pb, Hg, Ni und Cd, die auch zu den prioritären Substanzen gehören, erfolgreich demonstriert werden, wie diese zwanglos und effizient verfügbar gemacht werden können. Von zentraler Bedeutung waren dabei Laboratorien, die sowohl hinsichtlich der Analyse der prioritären Stoffe erfahren sind, als auch mit der Organisation von Vergleichsmessungen im Rahmen nationaler QS-Systeme betraut sind. Beispielsweise waren dies in Deutschland die Laboratorien für Umweltanalytik der Länder. Ein Ziel des Projektes war, diese

„potenziellen Kalibrierlaboratorien“ (PCL) in die Lage zu versetzen, für die von ihnen organisierten Vergleichsmessungen rückgeführte Referenzwerte zur Verfügung zu stellen. Damit wird den Teilnehmern ermöglicht, ihre Messverfahren metrologisch zu validieren und die Rückführung auf das Internationale Einheitensystem (SI) sicherzustellen. Der Anschluss der PCLs an die Nationalen Metrologieinstitute wurde mit Hilfe einer Vergleichsmessung hergestellt. ■

- [1] Schiel, D.; Rienitz, O.; Jährling, R.; Güttler, B.; Matschat, R.; Scharf, H.; Birkhahn, J.; Labarraque, G.; Fiscaro, P.; Quétel, C.; Borchers, U.; Schwesig, D.: Metrological concept for comparable measurement results under the Water Framework Directive – Demonstration of its applicability in elemental analysis. Accreditation and Quality Assurance (AQUAL), Volume 16, Issue 10 (2011), Page 489–498

\* Dr. Detlef Schiel,  
Arbeitsgruppe „Anorganische Analytik“  
E-Mail:  
detlef.schiel@ptb.de



Im Rahmen des Projektes aufgebautes europäisches Netzwerk aus vier Metrologieinstituten (NMIs) und 22 „Potenziellen Kalibrierlaboratorien“ (PCLs) aus 10 europäischen Ländern (plus zwei Laboratorien aus Israel und zwei NMIs aus nicht-europäischen Ländern). Die NMIs entwickelten die primären Messverfahren und lieferten die Referenzwerte für die verwendeten Proben. Die PCLs warben ihrerseits über 100 Routinelaboratorien aus 17 EU-Ländern an, um diese mit einer weiteren Vergleichsmessung anzuschließen und zertifizierten die hierfür verwendeten Proben.

# Überwachung radioaktiver Stoffe in der Umwelt

Herbert Wershofen\*, Dirk Arnold

Wenn die Umwelt mit Radionukliden kontaminiert wird, erwarten Entscheidungsträger und die Öffentlichkeit schnelle, hochempfindliche und zuverlässige Messungen zur Bewertung möglicher radiologischer Folgen. Die Zuverlässigkeit der Messungen wird durch die Rückführung der Messergebnisse auf nationale Primärnormale erreicht. Die empfindlichsten Messungen radioaktiver Stoffe in der Luft führen die Spurenmessstellen durch, die damit zur realistischen Abschätzung auch vernachlässigbar kleiner, zusätzlicher Strahlenexpositionen beitragen.

Der Fachbereich Radioaktivität der PTB realisiert die gesetzliche Einheit Becquerel (Bq) in Form von Aktivitätsnormalen, die entsprechend der Halbwertszeiten der darin enthaltenen Radionuklide immer wieder neu hergestellt werden. Damit werden Messgeräte kalibriert, aber auch realistische Referenzmaterialien für Vergleichsmessungen anderer Bundesbehörden hergestellt. Dabei kommen sowohl mit einer Aktivitätsnormal-Lösung dotierte Umweltproben als auch natürlich radioaktive Referenzmaterialien zum Einsatz. Die Referenzwerte der spezifischen Aktivität radioaktiver Nuklide in diesen Materialien werden durch Kalibriermessungen der PTB mit geringer Unsicherheit bestimmt.

Die Spurenmessung bzw. Spurenanalyse radioaktiver Stoffe in der Luft ist die sehr empfindliche Messung kleinster Aktivitätskonzentrationen. 2011

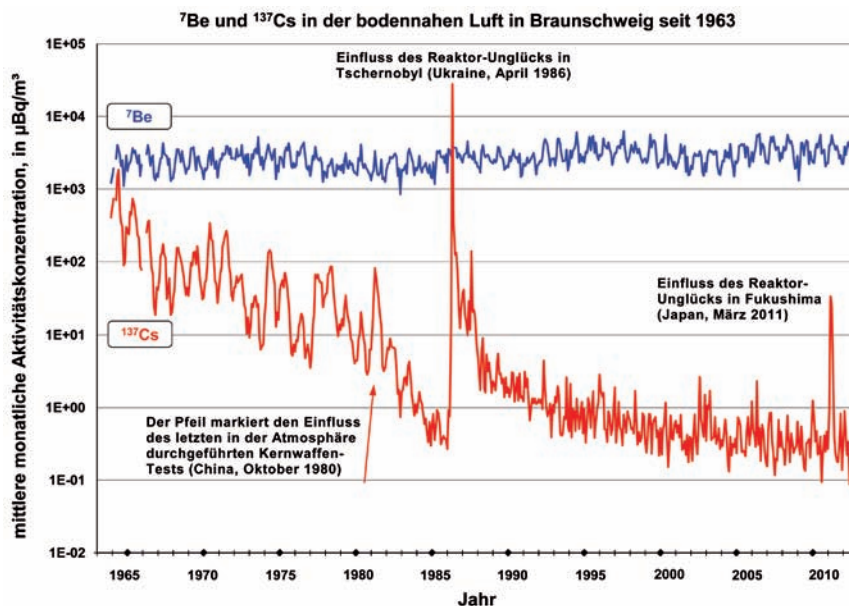
wurden kurzlebige Radionuklide aus Kernreaktoren im ca. 9000 km entfernten Fukushima täglich in der PTB gemessen [2]. Radiologisch waren die in Deutschland gemessenen Aktivitätskonzentrationen unbedeutend, wurden aber z. B. zur korrekten Bilanzierung der genehmigten Ableitungen der Kernkraftwerke benutzt.

Spurenmessungen, wie sie an der PTB seit 1963 erfolgen [1], sind für radioökologische Untersuchungen oder zur Feststellung von Untergrundpegeln erforderlich. Die Abbildung zeigt den zeitlichen Verlauf der Aktivitätskonzentration des natürlich radioaktiven <sup>7</sup>Be und des anthropogenen <sup>137</sup>Cs. Die Aktivitätskonzentration des <sup>7</sup>Be schwankt in einem konstanten Bereich, während die des <sup>137</sup>Cs, das aus Kernwaffentests stammt, bis 1986 abnahm. Im Mai jenen Jahres stieg sie kurzfristig als Folge des Kernkraftwerkunfalls von Tschernobyl deutlich über die des <sup>7</sup>Be. Nach dem Unfall in Fukushima lagen die Spitzenwerte um etwa drei bis vier Größenordnungen niedriger. ■

- [1] H. Wershofen, D. Arnold: Radionuclides in Ground-level Air in Braunschweig - Report of the PTB Trace Survey Station for 1998 to 2003. PTB-Bericht Ra-45, ISSN 0341-6747, ISBN 3-86599-431-7 Braunschweig, November 2005
- [2] Link zu täglichen Messergebnissen der PTB nach dem Fukushima-Unfall 2011: <http://www.ptb.de/de/org/6/61/612/kurve/taeglich.pdf>

\* Dr. Herbert Wershofen, Arbeitsgruppe „Umweltradioaktivität“  
E-Mail: herbert.wershofen@ptb.de

Zeitlicher Verlauf der Aktivitätskonzentration des natürlich radioaktiven Nuklids <sup>7</sup>Be und des anthropogenen <sup>137</sup>Cs.





## Rückgeführte Radiometrie für die Erdfernerkundung

Christian Monte, Berndt Gutschwager, Jörg Hollandt\*

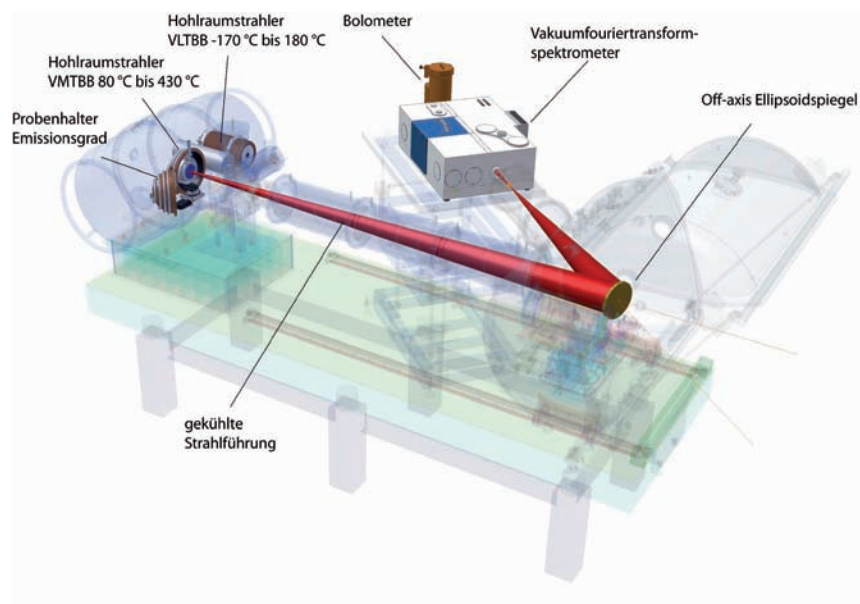
Messungen mit optischen Fernerkundungsverfahren von Flugzeugen und Satelliten leisten heutzutage einen ganz wesentlichen Beitrag zur globalen Erdüberwachung. Mit ihnen sind sowohl eine großflächige Überdeckung als auch eine kontinuierliche Beobachtung möglich. Sie liefern Informationen, auf deren Basis unter anderem politische Entscheidungen getroffen werden, über welche Maßnahmen ein möglicher Klimawandel gemindert werden soll. Die harschen Umgebungsbedingungen der Satelliten, Flugzeuge oder Ballone und auch die notwendige Korrektur des Einflusses der Atmosphäre auf die Messergebnisse tragen dazu bei, die derzeit erreichbaren Messunsicherheiten deutlich zu begrenzen. Andererseits benötigen Klimamodelle radiometrische Messdaten über lange Zeiträume mit Unsicherheiten, die teilweise selbst unter Laborbedingungen eine metrologische Herausforderung darstellen. Daraus folgt, dass für vergleichbare und ausreichend genaue Erdfernerkundungsdaten die Rückführbarkeit und Unsicherheit der Messdaten in allen Schritten ihrer Gewinnung und Auswertung nach metrologisch validierten Verfahren ermittelt und verbessert werden muss.

Die Arbeiten sind umso wichtiger, als die "Group on Earth Observation" (GEO), ein internationaler Zusammenschluss von Raumfahrtbehörden und Geoforschungseinrichtungen, plant, bis zum Jahr 2015 ein globales Erdbeob-

achtungssystem (GEOSS: Global Earth Observation System of Systems) einzurichten. Damit ein solches umfassendes System funktioniert, müssen nicht nur die Sensoren, die von den verschiedenen Einrichtungen für ein Messverfahren eingesetzt werden, vergleichbare Ergebnisse liefern, sondern auch unterschiedliche Messverfahren, also beispielsweise Verfahren, die im optischen und Mikrowellenbereich arbeiten. Ebenso müssen satellitengestützte Messungen aus dem Weltraum, flugzeug- und ballongestützte Messungen in der Atmosphäre und Messnetze an der Erdoberfläche konsistente Ergebnisse liefern, um belastbare Aussagen zu machen. Hier setzen aktuelle Forschungsprojekte an, die dazu beitragen sollen, dieses hochgesteckte Ziel zu erreichen. Die PTB trägt mit ihren teilweise einzigartigen radiometrischen und thermometrischen Messplätzen wesentlich zu diesen Forschungsprojekten bei.

Zurzeit werden an dem in der Abbildung gezeigten Messplatz im Rahmen eines internationalen Projekts flugtaugliche Infrarot-Strahlungsnormale charakterisiert und kalibriert. Mit diesen Referenzstrahlern können Hyperspektralradiometer an Bord von Flugzeugen, Ballons oder Satelliten klimarelevante Größen rückgeführt bestimmen, wie zum Beispiel die Oberflächentemperatur der Erde oder Verteilungen von Temperatur und Spurengaskonzentrationen in der Atmosphäre. ■

\* Dr. Jörg Hollandt, Fachbereich „Detektorradiometrie und Strahlungsthermometrie“, E-Mail: joerg.hollandt@ptb.de



Der Messplatz für Strahlungsthermometrie unter Vakuum mit reduziertem Wärmestrahlungshintergrund an der PTB zur Kalibrierung von Referenzstrahlern für Klimaforschungsmissionen.



## Metrologie für die Meeresforschung

**Petra Spitzer\***

Die räumlichen Unterschiede in der Dichte des Meerwassers, hervorgerufen von Temperatur- und Salinitätsgradienten, sind der Antrieb für die tiefen Meeresströmungen, die wiederum in großem Maße unser Klima bestimmen. Bereits kleine Veränderungen in der Zusammensetzung des Meerwassers können das bestehende Gleichgewicht empfindlich stören, was sich in veränderten klimatischen Verhältnissen, aber auch in Änderungen der Artenvielfalt in den Ozeanen niederschlagen kann. In der Klimaforschung werden daher sehr geringe Veränderungen von Temperatur und Salzgehalt, aber auch von pH-Wert und Sauerstoffgehalt über große Zeiträume (Jahrzehnte, Jahrhunderte) gemessen, analysiert und modelliert.

Um eine Vergleichbarkeit der weltweit und über sehr lange Zeiträume gewonnenen Daten zu gewährleisten, ist es für ozeanografische Beobachtungssysteme sehr wichtig, diese Parameter mit bekannter Unsicherheit auf das SI rückgeführt messen zu können. Nur Messwerte mit bekannter Unsicherheit können als Grundlage für die breite langfristige Anwendung von Meerwasserbeschreibungen dienen, wie sie z. B. im neuen internationalen Seewasserstandard TEOS-10 vorliegt.

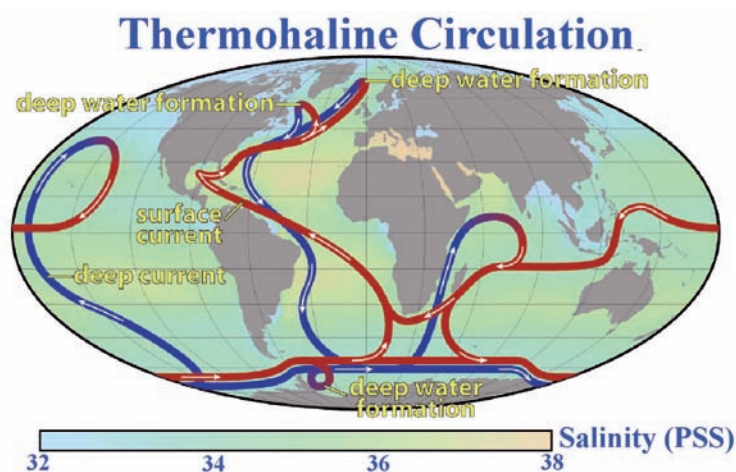
Dies ist Gegenstand eines gemeinsamen Forschungsprojektes von elf europäischen Partnern aus metrologischen Instituten und Universitäten.

Die PTB koordiniert das Projekt und leitet auch das Arbeitspaket zur Einführung einer Rückführungskette der Praktischen Salinität auf Dichtestandards. Dadurch wird es möglich sein, diese etablierte Messgröße auf das SI rückgeführt zu messen. Beiträge wird die PTB auch zur Messung der Schallgeschwindigkeit und der Temperatur sowie zur Entwicklung von pH-Standards liefern.

Eine weiteres Ziel des Projektes ist eine verbesserte Vergleichbarkeit von Messungen des pH-Wertes und des Sauerstoffgehaltes von Meerwasser, sowie die zuverlässige Bestimmung von Nährstoffen, wie Nitraten, Phosphaten und Silikaten und von Spuren von Eisenspezies, die hauptsächlich durch atmosphärischen Staub in die Ozeane eingetragen werden.

Die Bedeutung, die dem Projekt in der ozeanographischen Fachwelt beigemessen wird, lässt sich an der Zahl und dem Umfang der Kooperationspartner erkennen. Internationale Organisationen wie beispielsweise das Scientific Committee on Ocean Research, die International Association for the Physical Sciences of the Oceans, das International Geotraces Project sind hier ebenso vertreten wie das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie und das Leibniz-Institut für Ostseeforschung.

\* Petra Spitzer,  
Arbeitsgruppe  
„Elektrochemie“  
E-Mail:  
petra.spitzer@ptb.de



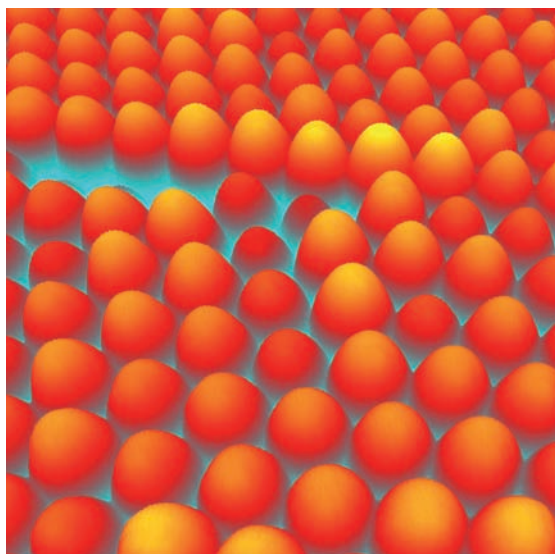
Die Karte zeigt die Variation des Salzgehaltes der Meere in der Praktischen Salinitätsskala. Als rote und blaue Linie dargestellt ist die durch Dichteunterschiede angetriebene weltumspannende thermohaline Zirkulation des Meerwassers.

Image courtesy of Richard Simmon/NASA

# Metrologie für neue Technologien

Harald Bosse\*

Die Neu- und Weiterentwicklung von Produkten erfordert in den verschiedenen Phasen der Produktentwicklung – Vorlaufforschung, Entwicklung, Prototypfertigung und optimierte Produktion – den Einsatz einer unterstützenden, an die jeweiligen Entwicklungsstufen bzgl. Auflösung, Geschwindigkeit, Robustheit, Vergleichbarkeit, Messunsicherheit und Kosten bestangepassten Messtechnik. Dies gilt insbesondere auch für die Produktentwicklung im Rahmen neuer Technologien. Hierzu werden in Anlehnung an das EU-Forschungsprogramm NMP die Nanotechnologien, Werkstoffe bzw. Materialien und neue Produktionstechnologien gezählt, die als wichtige Technologiebereiche für die angestrebte Transformation einer ressourcenbasierten zur wissensbasierten Industrie identifiziert wurden. In diesem Abschnitt sollen Beiträge der PTB zur metrologischen Unterstützung der neuen Technologien dargestellt werden, ergänzt durch einige Beispiele, die auf bestimmte Entwicklungen näher eingehen.



**Bild:**  
Die farblich bearbeitete Aufnahme des Rasterkraftmikroskopes zeigt Kunststoffkugeln aus Polystyrol. Als Größenvergleich: Ein Haar ist so dick wie 300 dieser Kugeln nebeneinander. Für die PTB ist vor allem die symmetrische Anordnung dieser Nanoobjekte in der Anwendung als zweidimensionales Kalibriergitter von großem Interesse: Es lässt sich wie ein Lineal verwenden, mit dessen Hilfe man die Größe anderer Objekte bestimmen kann. Dieses Bild, das eher aus ästhetischen Gründen gemacht wurde, zeigt allerdings Unregelmäßigkeiten im Kristallgitter.  
Bild: Danzebrink

## Nanotechnologie

Die Bundesregierung beschreibt in dem „Aktionsplan Nanotechnologie 2015“ [1] die Nanotechnologie als eine der Schlüsseltechnologien für Deutschland, mit großem Potenzial für die Entwicklung neuer Produkte, Verfahren und Dienstleistungen in einem weiten Bereich unterschiedlicher Anwendungen, von neuen Materialien bis hin zur Medizin. Das 2005 zur Harmonisierung der Terminologie sowie zur Erarbeitung spezifischer Normen im Bereich der Nanotechnologie eingerichtete internationale Normungskomitee ISO TC 229 „Nanotechnologies“ hat folgende Definition veröffentlicht: „Nanotechnology: application of scientific knowledge to manipulate and control matter in the nanoscale (size range from approximately 1 nm to 100 nm) in order to make use of size- and structure-dependent properties and phenomena, as distinct from those associated with individual atoms or molecules or with bulk materials“ [2].

Die Arbeiten der PTB mit Bezug zur Nanotechnologie sind – dem Aufgabenspektrum der PTB gemäß – auf den Bereich der Nanometrologie konzentriert. Hierunter werden alle Aktivitäten zur rückgeführten messtechnischen Charakterisierung nanoskaliger Objekte und Strukturen verstanden, wobei als Bezug für die Messergebnisse das SI, das Internationale Einheitensystem, gilt. Ziel ist es, durch Entwicklung neuer Messmethoden sowie auch durch Anwendung verbesserter etablierter Messverfahren zu vergleichbaren Messergebnissen an nanoskaligen Objekten und Strukturen innerhalb der für deren Anwendung geforderten Messunsicherheiten zu gelangen. Eine besondere Herausforderung in der Nanometrologie ist durch die geringe Abmessung der zu charakterisierenden Strukturen bedingt; die zur Messung geeigneten Methoden sollten deshalb hinsichtlich ihrer Auflösung an die Nanoskaligkeit der Messobjekte angepasst sein. Allerdings erfordert die rückgeführte Bestimmung von interessierenden Parametern der Nanoobjekte, wie z. B. ihrer Abmessungen, inklusive der Abschätzung der beigeordneten Messunsicherheiten auch bei den hoch auflösenden Messverfahren wie z. B. der Rastersondenmikroskopie oder der Rasterelektronenmikroskopie, eine explizite Berücksichtigung der Wechselwirkung der Messsonde mit dem Messobjekt. In dem angeführten Beispiel des Rastersondenmikroskops hat

\* Dr. Harald Bosse,  
Abteilung „Fertigungsmesstechnik“  
E-Mail:  
harald.bosse@ptb.de

ein Modell für den Messprozess unter anderem die Form und Abmessung der nanoskalig feinen Sonden spitze, sowie die Antastcharakteristika der Sonden spitze an die Oberfläche des Nanoobjekts zu berücksichtigen, beim Rasterelektronenmikroskop sind unter anderem die Streuprozesse der Primär- und Sekundärelektronen in der Nanostruktur zu berücksichtigen. Ein Beispiel für die Anwendung der Rasterelektronenmikroskopie für die rückgeführte Bestimmung von Größe und Größenverteilung von Nanopartikeln ist im anschließenden Beitrag *Nanopartikel-Charakterisierung mittels Elektronenmikroskopie* (S. 38) dargestellt [3].

Generell lässt sich bei der Charakterisierung von Nanostrukturen und Nanopartikeln zwischen mikroskopischen und integralen Messmethoden, wie z. B. Streulichtmethoden, differenzieren. Während die mikroskopischen Verfahren die Untersuchung einzelner Nanoobjekte erlauben, geben die integralen Messmethoden Aussagen über ein Ensemble von Nanoobjekten. Beispiele von integralen, in der PTB angewandten Messverfahren sind die Kleinwinkel-Röntgenstreuung zur Untersuchung von Nanopartikel-Proben in wässriger Umgebung [4] sowie scatterometrische Messverfahren bei verschiedenen Wellenlängen von tiefem Ultraviolett (DUV) [5] bis hin zum extremen Ultraviolett (EUV) [6] zur Charakterisierung von Gitterstrukturen auf Messobjekten der Halbleiterindustrie. Hierbei wird die EUV-Strahlung mit einer Wellenlänge von 13,5 nm von Synchrotron-Strahlungsquellen (BESSY II und MLS) zur Verfügung gestellt. Der Beitrag *Charakterisierung von Nanostrukturen auf Photomasken* (S. 39) zeigt die in der PTB zur dimensionellen Charakterisierung der Abmessungen von Nanostrukturen auf Photomasken verwendeten optischen Messmethoden, die zusätzlich durch Rastersondenmikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie ergänzt werden. Zur Messung der Position von Mikro- und Nanostrukturen auf Masken und eindimensionalen Strichmaßstäben von bis zu 600 mm Länge steht mit einem speziellen Vakuum-Interferenzkomparator, dem so genannten Nanometerkomparator, ein exzellentes Referenz-Messgerät zur Verfügung, welches an geeigneten Messobjekten Messunsicherheiten im Nanometerbereich ermöglicht [7].

In der Lithografie, aber auch zur Strahlformung in Synchrotron-Strahlungsquellen, werden extreme Anforderungen an die Rauheit und Form der verwendeten optischen Komponenten wie Linsen- oder Spiegeloberflächen gestellt. Die bei der Fertigung einzuhaltenden dimensionellen Toleranzen liegen dabei häufig schon im Sub-Nanometerbereich. Für die Bestimmung der Oberflächenform wurden in der PTB referenzfreie Messmethoden entwickelt, die auf der Messung und Auswertung lokaler Oberflächenneigungen der zu bestimmenden Probenoberfläche basieren

[8]. Diese lokalen Oberflächenneigungen werden mittels elektronischer Autokollimatoren gemessen, die vorab hochgenau auf dem Referenz-Winkelkomparator der PTB kalibriert werden können [9]. Für die Bestimmung der Rauheitsanteile an Oberflächen stehen in der PTB verschiedene taktile, optische und rastersondenmikroskopische Messmethoden zur Verfügung. Hierbei bietet ein metrologisches Rastersondenmikroskop mit einem großen Messbereich von 25 mm × 25 mm × 5 mm die Möglichkeit, spektrale Anteile der Oberflächenabweichungen im Rauheits-, Welligkeits- und teilweise auch im Formbereich simultan bestimmen zu können [10]. Hier engagiert sich auch die Geschäftsstelle des Nanotechnologie-Kompetenzzentrums für ultrapräzise Oberflächenbearbeitung (CC UPOB), die in der PTB betrieben wird, sehr stark [11].

Ein für die PTB besonders interessanter Aspekt der Nanotechnologie ergibt sich aus der Möglichkeit, nanotechnologische Entwicklungen für die Metrologie selbst nutzbar zu machen. Ein Beispiel für eine solche Anwendung von Nanostrukturen für die Verbesserung der Sensitivität eines Messverfahrens stellt die oberflächenverstärkte Raman-Streuung (surface enhanced Raman Scattering (SERS)) dar. Durch die Nutzung von Plasmonen-Effekten an metallischen Nanopartikeln bzw. Nanostrukturen ergeben sich deutliche Erhöhungen der Intensität des lokalen elektrischen Feldes in der Nähe der Nanostrukturen. Zu untersuchende Analyte, die sich in Lösung in der Nähe der Nanostrukturen und damit in Bereichen deutlich erhöhter lokaler E-Felder befinden, werden zu deutlich stärkerer Raman-Streuung angeregt. Die Intensitätserhöhung des Raman-Signals im Vergleich zur konventionellen Raman-Spektroskopie kann z. B. einen Faktor von ca. 1000 betragen; diese deutliche Sensitivitätssteigerung ermöglicht erst eine Untersuchung von Analyten im Bereich ihrer natürlichen Konzentration, z. B. von Kreatinin im Blutserum [12].

Für die Fertigung von Nanostrukturen, z. B. für die nanostrukturierten SERS-Substrate, primär aber für die Realisierung von elektrischen Quantennormalen, betreibt die PTB Verfahren zur lithografischen Strukturierung von Substraten; dabei wird die höchste Auflösung mit Methoden der Elektronenstrahlolithografie erzielt. Ergänzt werden die lithografischen Fertigungsverfahren durch Methoden der Laserstrukturierung sowie durch Verfahren der mechanischen Ultrapräzisionsbearbeitung; einen Überblick hierzu gibt [13].

Ein weiteres Arbeitsgebiet der PTB ist die Bestimmung der magnetischen Eigenschaften eines Nanopartikel-Ensembles sowie einzelner Nanopartikel. Magnetische Nanopartikel werden beispielsweise in der medizinischen Diagnostik und Therapie eingesetzt (directed magnetic drug

targeting, magnetic thermoablation). Magnetische dünne Schichten und gekoppelte Schichtsysteme sind Kernkomponenten für die Datenspeicherung in Festplatten. Mit dem Begriff der Spintronik werden mögliche Anwendungen magnetischer Nanostrukturen als nichtflüchtige dynamische Speicherbausteine in der Elektronik umschrieben. Hier betreibt die PTB u. a. Untersuchungen zur Dynamik der Magnetisierungsprozesse in nanostrukturierten magnetischen Speicherzellen [14].

Für auf die SI-Längen-Definition rückgeführte Längenmessungen mit angestrebten Unsicherheiten im nm-Bereich und darunter werden im Labor üblicherweise optische Interferometer mit Wellenlängen der optischen Strahlung im sichtbaren Spektralbereich eingesetzt (z. B. HeNe-Laser mit  $\lambda = 632 \text{ nm}$ ). Um hiermit Verschiebungen im Nanometer-Bereich zu messen, müssen die Interferometersignale elektronisch interpoliert werden. Hierbei können, bedingt durch Restabweichungen bei der Ausrichtung der Interferometerkomponenten sowie nichtidealer optischer Eigenschaften der Komponenten, Nichtlinearitäten der Interpolation generiert werden, die Längenmessabweichungen von einigen Nanometern bedingen. In der PTB werden deshalb auch Messmethoden untersucht und angewandt, die das Potential von kristallinen Volumen- und Oberflächengittern für Längenmessungen in der Nanometrologie nutzbar machen [15]. Ein Beispiel hierfür ist das Röntgen-Verschiebeinterferometer, bei dem eine Verschiebung der beweglichen Lamelle eines monolithischen Si-Einkristalls um  $0,192 \text{ nm}$  ( $220$  Gitterebenenabstand) bereits ein vollständiges Interferenzsignal am Detektor des Röntgen-Interferometers bewirkt.

Eine Analyse der künftigen Anforderungen an wesentliche Bereiche der Nanometrologie in Europa wurde im Rahmen eines europäischen Projekts unter Mitwirkung der PTB erarbeitet [16]. Die Ergebnisse des Projekts werden unter anderem bei der Ausgestaltung des 8. Forschungsrahmenprogramms der EU im Bereich der Nanometrologie Berücksichtigung finden und somit auch Auswirkung auf die künftigen Aktivitäten der PTB im Bereich der Nanometrologie als messtechnischer Basis für die Nanotechnologie haben.

## Neue Materialien

Materialspezifische Fragestellungen sind das primäre Aufgabengebiet des Schwesterinstitutes der PTB im Geschäftsbereich des BMWi, der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Berlin. Bei der Untersuchung bestimmter Eigenschaften einiger für technische Anwendungen besonders bedeutender Materialien ist allerdings die messtechnische Kompetenz der PTB vorteilhaft einzubringen.

Ein Beispiel stellt die Untersuchung der thermischen Eigenschaften sowie der Langzeitstabilität und der Kompressibilität von ausdehnungsarmen Hightech-Gläsern, -Glaskeramiken und -Keramiken dar, die sowohl in Präzisions-Fertigungsgeräten, wie z. B. DUV- und EUV-Wafer-Stepper für die lithografische Herstellung von integrierten Schaltungen, als auch in Präzisions-Messgeräten vielfach eingesetzt werden. Die Einsatzmöglichkeiten betreffen hier zum einen temperaturstabile, strukturelle Komponenten in den Fertigungs- und Messmaschinen und zum anderen Substrate aus den stabilen Materialien mit mikrostrukturierten Teilungen als maßbestimmende Komponente für Präzisions-Längen- und Winkel-Messsysteme. Die Untersuchung der Stabilität mit geringstmöglichen Unsicherheiten erfolgt hierbei an endmaßförmigen Materialproben in speziellen interferentiellen Längenkomparatoren, die eine gezielte Variation von Druck und Temperatur erlauben. Einzelheiten zu der angewandten Methode sind im Beitrag *Stabilität von Hightech-Materialien* (S. 40) dargestellt, einen Überblick hierzu gibt [17].

Die Härte von Materialien sowie die von auf Oberflächen aufgetragenen Schichten und Schichtsystemen ist eine für deren Funktion sehr wichtige Materialeigenschaft. So ist die Materialhärte für die Wahl mechanischer Bearbeitungsmethoden von Werkstoffen entscheidend, außerdem bestimmt die Härte als Materialeigenschaft auch maßgeblich den Verschleiß von Oberflächen im Kontakt. Zur rückgeführten Bestimmung der Härte als Materialeigenschaft sind Untersuchungen erforderlich, bei denen ein definierter Eindringkörper (Material, Form, Abmessungen) mit bestimmter Kraft auf die zu untersuchenden Probenoberfläche in definierter Weise (Messzyklus aus Belastungs- und Entlastungsphase) einwirkt. Zur Erzielung geringer Messunsicherheiten sind somit präzise Messungen der wirkenden Kraft, der Form des Eindringkörpers und der Geometrie des bei der Härteprüfung entstandenen Eindrucks in der Probenoberfläche erforderlich.

Eine besondere Herausforderung ist dabei die Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften von dünnen Schichten im Sub-Mikrometerbereich und von Nanostrukturen, die mit dem Verfahren der Nanoindentation untersucht werden [18]. Für die Eindringversuche dürfen bei diesen Proben nur sehr geringe Kräfte im Nanonewton-Bereich angewendet werden; eine entsprechende Normal-Messeinrichtung für die Rückführung dieser geringen (Nano)Kräfte ist in der PTB im Aufbau [19].

Auch in der Halbleiterindustrie spielen Materialinnovationen eine entscheidende Rolle, so z. B. bei der Entwicklung von Oxidschichten mit minimaler Dicke aber hinreichender elektrischer Isolation in modernen Halbleiter-Transistor-Bauelementen.



Die Aufklärung der Stöchiometrie und Schichtdicke von ultradünnen Isolatorschichten aus Materialien wie z. B. Hafniumsiliziumoxid ist eine Herausforderung an die quantitative analytische Messtechnik, der in der PTB mit dem Einsatz von synchrotronstrahlungsbasierter, röntgenspektrometrischer Methoden begegnet wird [20].

### Neue Produktionstechnologien

Eine zuverlässige messtechnische Infrastruktur ist unverzichtbare Voraussetzung für den Erfolg einer durch Herstellung innovativer Produkte sowie Entwicklung und Anwendung neuer Produktionstechnologien geprägten Volkswirtschaft. Die Überprüfung der tolerierten Merkmale bei der Fertigung der Komponenten und Produkte erfordert nach international anerkannten Qualitätssicherungsnormen den Einsatz rückgeführter Messgeräte. Dabei sichert die PTB an der Spitze der gemeinsam mit Herstellerfirmen und Kalibrierlaboratorien etablierten Kalibrierkette die Rückführung der Messwerte auf das SI über die nationalen Normale. Die PTB unterstützt somit durch die Umsetzung ihrer satzungsgemäßen Aufgabe der Weitergabe der Maße die industrielle Fertigung am Standort Deutschland sowie, bedingt durch die internationale Verflechtung der Fertigungsstrukturen, auch darüber hinaus.

Dies gilt zunächst für die Messgrößen und Messbereiche, die zur Qualitätskontrolle etablierter Fertigungsprozesse notwendig sind. Eine besondere Herausforderung stellt die Bereitstellung einer geeigneten messtechnischen Rückführung bei neuen Produktionstechnologien dar. Hierbei werden durch neue Fertigungsverfahren oder aber durch Erweiterung der Anwendungsbereiche eingeführter Produktionsprozesse neue Anforderungen an die messtechnische Abstützung der Prozesskontrolle gestellt. Im Folgenden sind für bestimmte Messgrößen einige Beispiele für Technologiebereiche aufgelistet, bei denen besondere messtechnische Herausforderungen für die Prozesskontrolle bestehen, die in der PTB adressiert werden:

- dimensionelle Messgrößen: auf der einen Seite Herausforderungen bei der Charakterisierung von Mikrokomponenten, bedingt durch die geringen Abmessungen und hohen Aspektverhältnisse der Strukturen sowie auf der anderen Seite sehr große Komponenten mit Abmessungen von 10 m und darüber hinaus, siehe Beitrag *Lasergestützte Messung großer Komponenten* (S. 41)[21].
- Temperaturmessgrößen: verbesserte Messverfahren für die Internationale Temperaturskala von -60°C bis 3000°C sowie Charakterisierung bildgebender Temperaturmesssysteme

- elektrische Messtechnik: Forschung zu anwendungsnahen Quantennormalen zum direkten Einsatz in der Produktionsumgebung
- optische Messtechnik: vollständige Charakterisierung der spektralen Eigenschaften neuartiger Effektlacke, die von der Beobachtungsrichtung abhängig sind
- mechanische Messgrößen: Hier bestehen besondere Herausforderungen bei der Bestimmung dynamischer mechanischer Größen, einen Überblick hierzu gibt der Beitrag *Dynamische Messung mechanischer Größen* (S. 42) [22].
- Druck- und Vakuum-Messtechnik: Erweiterung der Messbereiche und Verringerung der Messunsicherheiten, z. B. zur rückgeführten Bestimmung von Ausgasraten neuer Materialien

Neben der Offline-Messung unter den wohldefinierten Bedingungen im Messraum ist das fertigungsintegrierte Messen von zunehmender Bedeutung für eine effiziente und umfassende Prozesskontrolle. In der vom VDI veröffentlichten Roadmap „Fertigungsmesstechnik 2020“ [23] wird die Wichtigkeit der sogenannten Inline-Messtechnik für eine schnelle und sichere Prozessregelung betont. Es wird dort zudem darauf hingewiesen, dass auch die Inline-Sensoren und -Messgeräte rückzuführen sind. Die PTB arbeitet in Projekten und an Richtlinien zur Inline-Messtechnik mit [24]. Um Präzisionsmessgeräte, -komponenten und Normale nach den Anforderungen der PTB-Experten fertigen zu können, benötigt die PTB einen leistungsfähigen Gerätebau. Im Beitrag *Fertigungsintegriertes Messen* (S. 43) wird am Beispiel einer Testmassenfertigung für ein europäisches Raumfahrtprojekt die Bedeutung des fertigungsintegrierten Messens für die Präzisionsfertigung/-messtechnik dargestellt [25] ■.

### Literatur

- [1] Aktionsplan Nanotechnologie 2015: [www.bmbf.de/pub/aktionsplan\\_nanotechnologie.pdf](http://www.bmbf.de/pub/aktionsplan_nanotechnologie.pdf)
- [2] ISO/TS 80004-1:2010 Nanotechnologies – Vocabulary – Part 1: Core terms
- [3] Buhr E., Senfleben N., Klein T., Bergmann D., Gnieser D., Frase C. G. et al.: 2009 Characterization of nanoparticles by scanning electron microscopy in transmission mode. *Meas. Sci. Technol.* **20**, 084025
- [4] G. Gleber, L. Cibik, S. Haas, A. Hoell, P. Müller and M. Krumrey: Traceable size determination of PMMA nanoparticles based on Small Angle X-ray Scattering (SAXS). *J. Phys. Conf. Ser.* **247**, (2010), 012027
- [5] M. Wurm, F. Pilarski, B. Bodermann: A new flexible scatterometer for critical dimension metrology, *Rev. Sci. Instrum.* **81**, (2010), 023701-1-023701-8
- [6] H. Gross, A. Rathsfeld, F. Scholze and M. Bär: Profile reconstruction in extreme ultraviolet (EUV) scatterometry: modelling and uncertainty estimates. *Meas. Sci. Technol.* **20**, (2009), 105102 (11)

- [7] R. Köning, J. Flügge, H. Bosse: Achievement of sub nanometer reproducibility in line scale measurements with the Nanometer comparator. Proc. SPIE 6518 (2007)
- [8] G. Ehret, M. Schulz, M. Stavridis, C. Elster: A new flatness reference measurement system based on deflectometry and difference deflectometry, Fringe: 6<sup>th</sup> International Workshop on Advanced Optical Metrology, (2009), 318–323
- [9] Geckeler, R. D.; Just, A.: Optimized use and calibration of autocollimators in deflectometry, 2007, Proc. SPIE 6704, 670407-1-670407-12
- [10] Dai, G.; Pohlenz, F.; Danzebrink, H.-U.; Xu, M.; Hasche, K.; Wilkening, G.: Metrological large range scanning probe microscope. Rev. Sci. Instrum. **75**, (2004), 4, 962–969
- [11] Nanotechnologie Kompetenzzentrum Ultrapräzise Oberflächenbearbeitung e. V. (CC UPOB e. V.): <http://www.upob.de/>
- [12] Stosch, R.; Yaghobian, F.; Weimann, T.; Brown, R. J. C.; Milton, M. J. T.; Güttler, B.: Lithographical gap-size engineered nanoarrays for surface-enhanced Raman probing of biomarkers. Nanotechnology **22**, (2011), 105303
- [13] Rudolf Meeß, Tanja Mehlstäubler, Thomas Weimann: Fertigungsverfahren für die Nanometrologie. PTB-Mitteilungen **121**, (2011), Heft 2, S. 76–83
- [14] S. Serrano-Guisan, K. Rott, G. Reiss, J. Langer, B. Ocker and H. W. Schumacher: Biased quasi ballistic spin transfer torque magnetization reversal. Phys. Rev. Lett. **101**, (2008), 087201
- [15] Ludger Koenders, Gaoliang Dai, Thorsten Dziomba, Andre Felgner, Jens Flügge, Ulrich Kuetgens: Von konventionellen zu kristallinen Normalen: Über die Nutzung kristalliner Strukturen für die Nanometrologie. PTB-Mitteilungen **121**, (2011), Heft 2, S. 66–75
- [16] Co-Nanomet, Projekt im 7. Rahmenprogramm der EU: <http://www.co-nanomet.eu/>
- [17] R. Schödel.: Ultra high accuracy thermal expansion measurements with PTB's Precision Interferometer. Meas. Sci. Technol. **19**, (2008), 084003
- [18] K. Herrmann, D. A. Lucca, M. J. Klopstein, F. Menelao: CIRP sponsored international comparison on nanoindentation. Metrologia **47**, (2010), S50
- [19] V. Nesterov, M. Müller, L. L. Frumin, U. Brand: A new facility to realize a nanonewton force standard based on electrostatic methods. Metrologia **46**, (2009), 277
- [20] Burkhard Beckhoff, Philipp Hönicke, Michael Kolbe u. a.: Materialspezifische Messverfahren für die Nanotechnologie. PTB-Mitteilungen **121**, (2011), Heft 2, S. 61–65
- [21] K. Kniel, M. Franke, F. Härtig, K. Wendt: Dimensionelle Messung großer Strukturen; Tagungsband der 8. VDI-Fachtagung Koordinatenmesstechnik 2010
- [22] M. Kobusch, T. Bruns, R. Kumme: Dynamische Kalibrierung von Kraftaufnehmern, PTB-Mitteilungen **118**, (2008), Heft 3, S. 152–157
- [23] VDI Roadmap „Fertigungsmesstechnik 2020“: <http://www.vdi.de/44080.0.html>
- [24] P. Jatzkowski, K. Wendt: Koordinatenmesstechnik für Karosserien – Rückführung von optischen Produktionssystemen; Tagungsband der 8. VDI-Fachtagung Koordinatenmesstechnik 2010
- [25] Hagedorn, D.; Heyne, H.-P.; Reimann, H.; Neugebauer, M.; Grüner, S.; Metschke, S.; Löffler, F.: Fabrication and measurement development for precise test masses for the MICROSCOPE space project. euspen proceedings, Vol. **1**, (2009), 29–32

ATEMBERAUBEND.



**Ultrapräzise Positioniersysteme**  
für den Einsatz in Vakuum und Tieftemperatur.

**MOTION CONTROL**  
[www.pimicos.com](http://www.pimicos.com)

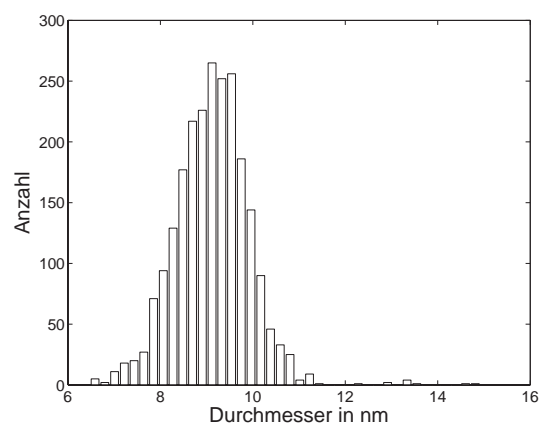
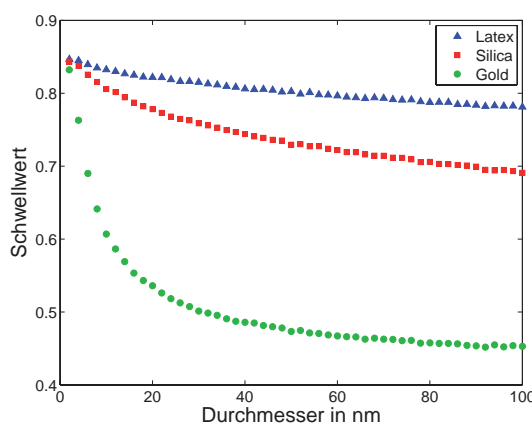
# Nanopartikel-Charakterisierung mittels Elektronenmikroskopie

Tobias Klein\* und Carl Georg Frase

Nanopartikel haben häufig andere Eigenschaften als „große“ Partikel derselben Materialien. Gerade dies macht sie für viele Anwendungen interessant, birgt jedoch auch potentielle Risiken für Mensch und Umwelt. Um Risiken abzuschätzen, aber auch für die technologische Weiterentwicklung, sind Verfahren wichtig, die die Größe dieser Partikel exakt messen. Daher hat die PTB ein Messverfahren für Nanopartikel auf der Basis eines Rasterelektronenmikroskops (REM) mit zusätzlichem Transmissionsdetektor entwickelt. So lässt sich ein generelles Problem bei der hochgenauen Messung von sphärischen Nanopartikeln lösen: die präzise Bestimmung des Partikelrandes, der selbst in hochauflösenden elektronenmikroskopischen Bildern etwas „verschmiert“ ist. Die Frage lautet: Bei welchem Grauwert beginnt das Partikel, und welcher Bild-Pixel ist noch Hintergrund? Um diesen Schwellwert bestimmen zu können, ist ein tiefgehendes Verständnis der Bildentstehung im Elektronenmikroskop nötig. Mit Hilfe einer in der PTB entwickelten Monte-Carlo-Simulation kann das Detektorsignal berechnet werden, wobei die Wechselwirkungen der Elektronen mit dem sphärischen Partikel und die Eigenschaften des

Detektors berücksichtigt werden. Dabei zeigt sich, dass der Schwellwert am Partikelrand von den Eigenschaften des Partikels abhängt, und zwar von Material und Größe. Um diese beiden Eigenschaften berücksichtigen zu können, wurde eine automatische Bildauswertung entwickelt. Sie berechnet auf der Basis der Simulationsergebnisse für jedes einzelne Partikel iterativ einen individuellen Schwellwert für den Partikelrand. Dies ermöglicht eine an das jeweilige Partikel angepasste, präzise Größenbestimmung. Trotz der aufwendigen Prozedur können in weniger als einer Stunde mehrere hundert Aufnahmen automatisch ausgewertet werden. Die Gesamtzeit für die vollständige Charakterisierung einer Nanopartikelprobe wird zusätzlich durch eine neu entwickelte Routine zum automatischen Aufnehmen vieler Nanopartikel-Bilder deutlich verkürzt. Mit dem neuen Verfahren können mittlere Partikelgrößen bis hinunter zu etwa 7 nm bei geringen Messunsicherheiten von 1 nm bis 2 nm bestimmt werden. Die Arbeiten wurden im Rahmen eines europäischen Metrologieforschungsprojekts durchgeführt, in dem auch eine Erweiterung des Verfahrens auf nichtsphärische Partikel verfolgt wurde. ■

\* Tobias Klein, Arbeitsgruppe „Quantitative Mikroskopie“  
E-Mail: tobias.klein@ptb.de



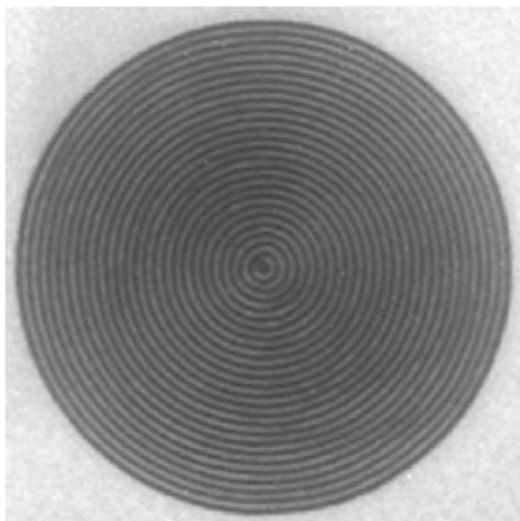
Berechnete Abhängigkeit des Schwellwerts zur Bestimmung der Partikelgröße im REM-Bild in Abhängigkeit von Partikelmaterial und -durchmesser (links) sowie an einer Gold-Nanopartikelprobe bestimmtes Histogramm der gemessenen Größenverteilung (rechts).

## Charakterisierung von Nanostrukturen auf Photomasken

Egbert Buhr\*, Bernd Bodermann

Integrierte Schaltkreise bestehen heute aus Strukturen, die zum Teil nur einige 10 Nanometer groß sind. Bei der lithografischen Herstellung dieser Halbleiterstrukturen werden als Vorlage Photomasken verwendet, die mit einer Genauigkeit von wenigen Nanometern zu fertigen sind. In der PTB wird u. a. die hochauflösende optische Mikroskopie zur Messung solcher Nanostrukturen weiterentwickelt, ein Weg besteht in der Verwendung einer kürzeren Wellenlänge. So wird gegenwärtig ein optisches Mikroskop mit einer Beleuchtungswellenlänge von 193 nm entwickelt und charakterisiert.

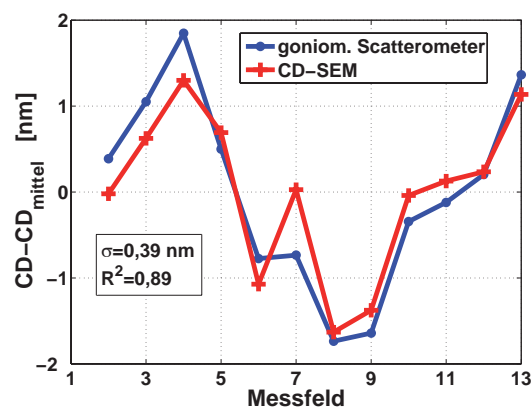
Zur genauen optischen Messung periodisch strukturierter Oberflächen wird ein alternatives, nicht-abbildendes Messverfahren eingesetzt. Hierbei wird die Oberfläche mit einem Laser beleuchtet. Aus der Winkelverteilung und den Intensitäten des gebeugten Lichtes lassen sich Größe und Form der Gitterstrukturen bestimmen. In der PTB wurde ein solches Scatterometrie-Messsystem auf Basis eines 193 nm-Lasersystems entwickelt. Noch kürzere Wellenlängen stehen der PTB an den Synchrotron-Speicherringen BESSY II und MLS in Berlin zur Verfügung: Dort sind Messungen u. a. bei einer Wellenlänge von 13,5 nm möglich. Strahlung dieser Wellenlänge wird bei der EUV-Lithographie eingesetzt, um noch kleinere Halbleiterstrukturen herstellen zu können.



Testaufnahme eines Kreisgitters (Abstand der Gitterlinien: 200 nm) mit dem im Aufbau befindlichen 193 nm-Mikroskop.

Neben den optischen Messtechniken werden weitere Verfahren wie die Rasterkraftmikroskopie (AFM) und die Rasterelektronenmikroskopie (SEM) für die Charakterisierung von Nanostrukturen auf Photomasken angewandt. Diese Verfahren bieten eine höhere Ortsauflösung, jedoch kann mit optischen Methoden i. d. R. schneller, berührungslos und objektschonender gemessen werden. Die Ergebnisse der verschiedenen Messverfahren müssen vergleichbar sein. Ein Beispiel ist im Bild unten rechts gezeigt.

Zur genauen Auswertung der Messdaten werden physikalische Modelle benötigt, die die Experimente möglichst exakt und realitätsnah beschreiben. Dazu müssen die Eigenschaften sowohl des Messsystems als auch des Messobjekts hinreichend gut bekannt sein. Zurzeit sind die numerischen Modellrechnungen und Datenauswertungen optischer Messergebnisse noch auf einfache Strukturmodelle beschränkt. Deshalb können Messungen mit kleiner Unsicherheit derzeit nur an hochwertigen Messobjekten mit gut definierten Strukturen durchgeführt werden. Zukünftige Herausforderungen für die optische Messtechnik liegen in der Erweiterung der Messverfahren auf komplexe 3D-Strukturen, Strukturen mit großem Höhen/Breiten-Verhältnis und mit komplexem Schichtaufbau. ■



Vergleichsmessungen der Strukturbreite mit einem Rasterelektronenmikroskop (CD-SEM) und dem PTB-Scatterometer an verschiedenen Messfeldern auf einer Photomaske; die Mittelwerte sind jeweils abgezogen: Die Variation der Strukturbreite unter den Messfeldern wird von beiden Systemen in gleicher Weise wiedergegeben, die Abweichungen liegen im Sub-nm-Bereich.

\* Dr. Egbert Buhr,  
 Fachbereich „Bild-  
 und Wellenoptik“  
 E-Mail:  
 egbert.buhr@ptb.de



## Stabilität von Hightech-Materialien

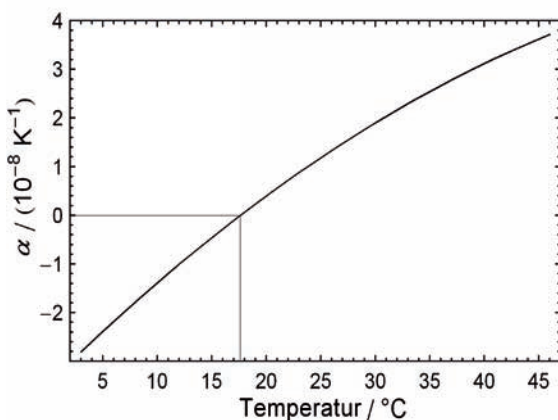
René Schödel\*

Thermisch stabile Materialien spielen eine wichtige Rolle in der dimensionellen Messtechnik und in der Präzisionsfertigung. Die zurzeit höchsten Anforderungen an die thermische Stabilität kritischer Komponenten werden in der EUV-Lithographie an die Reflexionsmasken und -spiegel gestellt. Diese basieren deshalb auf Substraten aus Hightech-Gläsern/Keramiken, die einen sehr geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  aufweisen sollen ( $\alpha < 1 \cdot 10^{-8} \text{ K}^{-1}$ ).

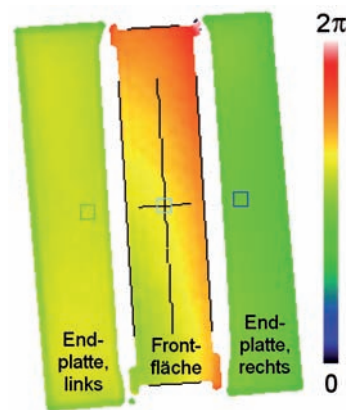
Zur präzisen Charakterisierung von endmaßförmigen Messobjekten aus Hightech-Materialien wurde ein Präzisionsinterferometer mit dem Ziel entwickelt, die absolute Länge von Proben von bis zu 400 mm mit Unsicherheiten im Sub-Nanometerbereich zu messen. Aus solch genauen Längenmessungen lässt sich der thermische Ausdehnungskoeffizient als Funktion der Temperatur mit Unsicherheiten bis zu  $2 \cdot 10^{-10} \text{ K}^{-1}$  berechnen. Weiterhin ist es möglich, quantitative Aussagen hinsichtlich Homogenität der thermischen Ausdehnung, Kompressibilität, Längenrelaxationen und auch der Langzeitstabilität von Proben zu erhalten. Längenmessungen mit Sub-Nanometer-

Unsicherheiten erfordern neben der Anwendung frequenzstabilisierter Laser die Berücksichtigung von Einflüssen, deren Unsicherheitsbeiträge nur schwierig zu minimieren sind. Dazu wurden in der PTB in den letzten Jahren verschiedene Methoden entwickelt und in den Messablauf integriert. Als Beispiel sei ein neues Autokollimationsverfahren erwähnt, welches dafür sorgt, dass die Lichtwellen exakt senkrecht auf die Oberflächen der Messobjekte treffen. Hierdurch wird der sogenannte Kosinusfehler unter  $10^{-11} \cdot l$  gesenkt. Zudem wird bei der elektronischen Auswertung der Interferenzbilder die genaue Zuordnung der Probenposition zu den Kamera-Pixel-Koordinaten berücksichtigt. Dies ist besonders wichtig bei Messobjekten mit größerer Parallelitätsabweichung der Endflächen aufgrund der temperaturbedingten Positionsänderungen während der Messungen. Durch Berücksichtigung des temperaturbedingten Einflusses der Durchbiegung der rückseitig angespannten Endplatte konnte die Präzision weiter gesteigert werden. Bei thermischen Ausdehnungsmessungen an typischen Proben werden nunmehr Längenmessunsicherheiten von 0,25 nm erreicht. ■

\* Dr. René Schödel,  
Fachbereich  
„Interferometrie an  
Maßverkörperungen“  
E-Mail:  
rene.schoedel@ptb.de



Thermischer Ausdehnungskoeffizient ( $\alpha$ ) eines speziellen Glases mit extrem niedriger thermischer Ausdehnung. Der dargestellte Verlauf von  $\alpha$  ergibt sich aus einer Reihe interferometrisch gemessener Längen eines Probekörpers mit parallelen Endflächen als Funktion der Temperatur. In diesem Beispiel gibt es bei ca. 17,5 °C einen Umkehrpunkt, an dem die thermische Ausdehnung verschwindet. Unterhalb dieses Punktes bewirkt eine Temperaturverringering eine Ausdehnung des Materials.



Das Bild zeigt eine typische Topographie der Interferenzphase, welche die Frontfläche des Körpers und eine angespannte Endplatte einschließt. Die gemittelten Phasenwerte innerhalb der eingezeichneten rechteckigen Bereiche auf der Endplatte (links/rechts) und auf der Frontfläche des Körpers (Mitte) stellen die Grundlage für die interferometrischen Längenmessungen dar.

## Lasergestützte Messung großer Komponenten

Frank Härtig\*, Klaus Wendt

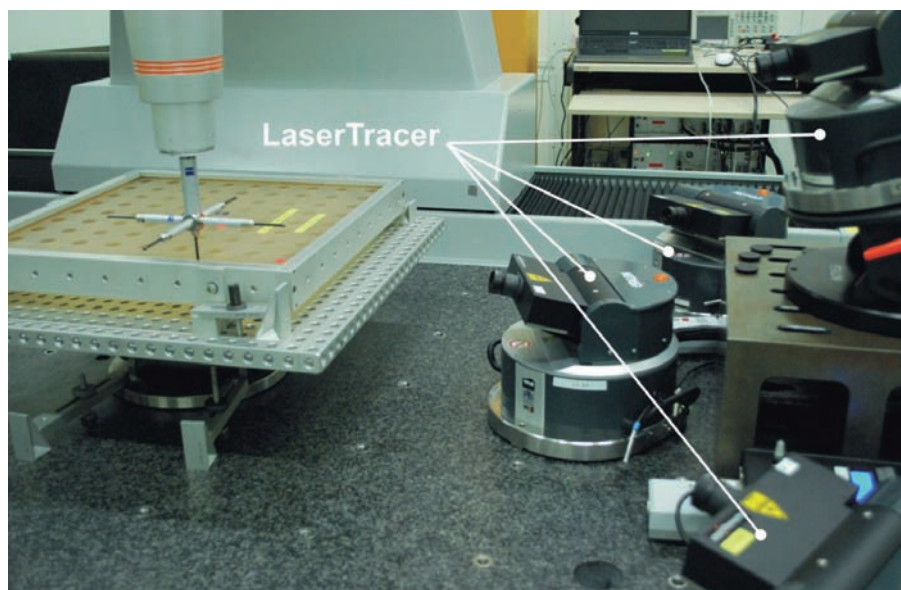
Für die Fertigungsüberwachung und Montage großer Werkstücke und Komponenten von mehreren Metern Größe steht eine Vielzahl moderner Messsysteme zur Verfügung. Abhängig von Aufgabenstellung und geforderter Genauigkeit nutzen die Systeme verschiedene Sensoren und Messprinzipien. Zu den lasergestützten 3D-Messsystemen gehören u. a. Lasertracker, Laserscanner und das triangulationsbasierte Indoor-GPS. Typische Anwendungen finden sich im Automobilbau, der Raum- und Luftfahrtindustrie, im Schiffs- und Kranbau, bei Windkraftgetrieben und vielen anderen technischen Bereichen, in denen Maß-, Form- und Positionstoleranzen an großen Bauteilen bestimmt werden müssen. Die Prüfung von Fertigungstoleranzen erfordert die Kenntnis der aufgabenspezifischen Messunsicherheit. Diese kann jedoch bisher nicht zufriedenstellend im Sinne der Rückführung angegeben werden. Ursache sind fehlende Messgeräte und -verfahren, mit denen Normale für die Industrie mit hinreichend kleiner Unsicherheit kalibriert werden können. In der PTB wurde deshalb im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes NIMTech ein portables, lasergestütztes Messverfahren entwickelt, das es ermöglicht, werkstückähnliche Großbauteile direkt vor Ort in der Industrie als Normale zu kalibrieren.

Das neue PTB-Messsystem M3D3 (Mobiles Multilaterations-3D-Messsystem) besteht im

Wesentlichen aus vier oder auch mehr hochgenauen, selbstnachführenden Laserinterferometern, den so genannten LaserTracern, die in der PTB mitentwickelt wurden und inzwischen kommerziell erhältlich sind. Während einer Messung verfolgt jeder LaserTracer als eigenständiges Messsystem einen Retroreflektor, der von einem Mover (z. B. Koordinatenmessgerät oder Roboter) im Messvolumen bewegt wird. Der Tracer führt dabei kontinuierlich interferometrische Längenmessungen aus. Aus den sehr genauen Längenmessungen werden durch Auswertung nach dem Multilaterationsprinzip 3D-Koordinaten der Reflektorpositionen berechnet. Vergleichsmessungen haben gezeigt, dass für beliebige Abstände zwischen Messpunkten kleinste Unsicherheiten von  $(0,2 \mu\text{m} + 0,2 \mu\text{m}/\text{m} \times L)$  erzielbar sind. Um die gleichzeitige Sichtbarkeit des Retroreflektors für alle LaserTracer bei der Messung großer Strukturen mit dem M3D3-System zu gewährleisten, wurde im Rahmen des Projektes ein spezielles, zweistufiges Verfahren entwickelt, welches auf alle Bewegungssysteme mit reproduzierbaren, systematischen Messabweichungen anwendbar ist.

Mit der Entwicklung des neuen mobilen Messverfahrens ist die PTB künftig in der Lage, werkstückähnliche Normale bis zu einer Baugröße von  $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$  vor Ort zu kalibrieren. Das Verfahren wurde anhand der Messung eines Großverzahnungsnormals im industriellen Umfeld erfolgreich erprobt. ■

\* Dr. Frank Härtig,  
Fachbereich „Koordinatenmesstechnik“  
E-Mail:  
frank.haertig@ptb.de



Validierung des M3D3-Messsystem unter Laborbedingungen

## Dynamische Messung mechanischer Größen

Thomas Bruns\*

In vielen Bereichen der industriellen Messtechnik, bspw. der Prozesssteuerung in der Produktion, der Komponentenprüfung oder der Sicherheitsprüfung, haben wir es bei der Messung mechanischer Größen wie Kraft, Drehmoment oder Druck mit zeitlich schnell veränderlichen Signalen zu tun. Diese Dynamik stellt die Metrologie vor neue Herausforderungen, denn die Rückführung der verwendeten Messgeräte auf nationale Normale basiert bislang auf statischen Verfahren. So werden nach dem Prinzip der Kraftwirkung einer Masse im Schwerfeld der Erde die (statischen) Skalen für Kraft, Druck und Drehmoment bei der PTB mit höchster Präzision dargestellt.

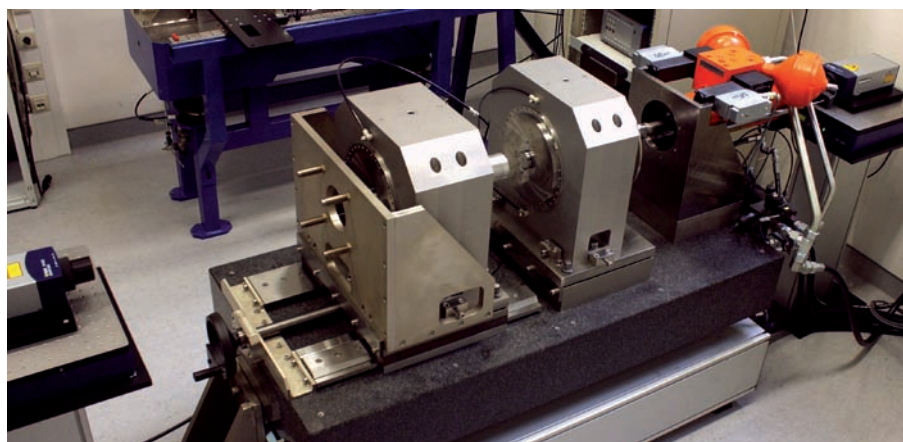
Für dynamische Anwendungen lassen sich die statisch ermittelten Aufnehmerkenngrößen jedoch nur noch bedingt anwenden. Denn in den dynamischen Systemen bewegen sich Massen, und die dabei auftretenden Trägheitskräfte der bewegten Komponenten und ihre Ankopplungssteifigkeiten an benachbarte mechanische Strukturen müssen berücksichtigt werden. Dies erfordert sowohl für die Kalibrierung als auch für die Anwendung neue Methoden der Darstellung und Weitergabe der Einheit aber auch der Datenanalyse und Messunsicherheitsbetrachtung.

In einem 2011 im Rahmen des europäischen Metrologieforschungsprogramms EMRP gestarteten Forschungsprojekt unter Beteiligung von neun

europäischen Metrologieinstituten werden grundlegende Arbeiten zur Schaffung einer Infrastruktur zur metrologischen Rückführung für die dynamische Messung mechanischer Größen durchgeführt. Schon in früheren Forschungsarbeiten hat sich die PTB eine weltweite Führungsposition auf dem Gebiet der dynamischen Messtechnik erarbeitet. Für die Messgröße Kraft existieren bereits mehrere experimentelle Einrichtungen zur primären dynamischen Kalibrierung von Aufnehmern mit periodischen oder pulsformigen Eingangsgrößen (siehe Bild). Für die Messgrößen Drehmoment und Druck wird an entsprechenden Einrichtungen zur dynamischen Primärkalibrierung gearbeitet.

Ziel des EMRP-Projektes ist es, die Einrichtungen und Konzepte u. a. durch Vergleich mit den europäischen Partnern zu validieren, sowie Methoden für die effektive Nutzung der Kalibrierergebnisse in der Industrie, also bspw. in DAkkS-akkreditierten Kalibrierlaboratorien, zu entwickeln. Eine besondere Rolle spielen dabei die mathematische Modellierung von Messketten und Messeinrichtungen sowie die numerischen Verfahren zur Identifikation (Quantifizierung) der Modellparameter. Auch die Entwicklung und Umsetzung von Methoden zur Berechnung und Fortpflanzung von Messunsicherheitsbeiträgen in dynamischen Systemen stellt eine große Herausforderung für alle Beteiligten dar. ■

\* Dr. Thomas Bruns, Arbeitsgruppen „Darstellung Beschleunigung“ und „Stoßdynamik“  
E-Mail: thomas.bruns@ptb.de



250-kN-Kraftstoß-Kalibriereinrichtung der PTB

## Fertigungsintegriertes Messen

**Daniel Hagedorn\*, Stephan Metschke, Uwe Langner,  
Heinz-Peter Heyne, Frank Löffler**

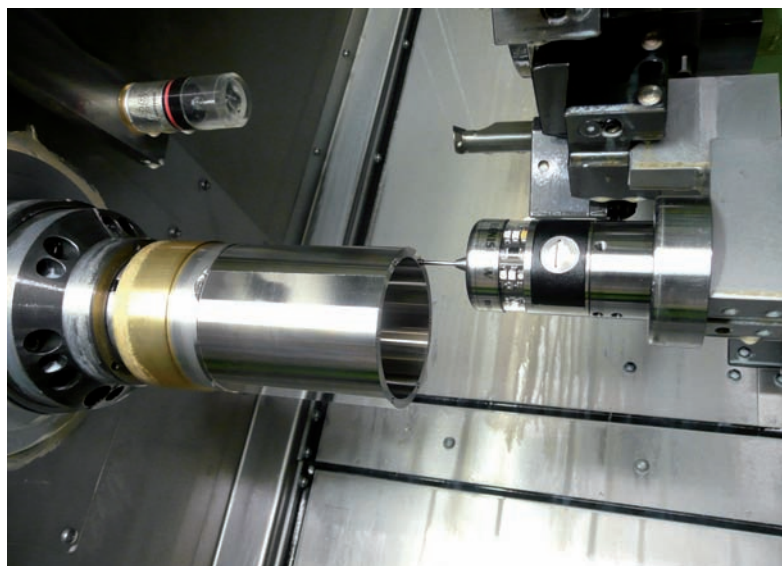
In der Metrologie, im Messgerätebau aber auch in der industriellen Serienproduktion ist der Trend zu immer komplexeren und genaueren Werkstücken ungebrochen. Während die Fertigungsgenauigkeit bei modernen Werkzeugmaschinen in einer Achse in der Regel bei ca. 8  $\mu\text{m}$  liegt, sind bei zu fertigenden Komponenten teilweise Genauigkeiten von wenigen Mikrometern an verschiedenen Geometrielementen gefordert. Diese Anforderungen lassen sich dann nur durch eine fertigungsintegrierte Messtechnik realisieren. Im Rahmen eines europäischen, satellitengestützten Weltraumexperiments zur Untersuchung des Äquivalenzprinzips von träger und schwerer Masse wurden im Wissenschaftlichen Gerätebau der PTB einige zylindrische Testmassenhülsen (siehe Bild) von einer Länge von ca. 80 mm und einem Durchmesser von ca. 70 mm hergestellt, mit Längen-, Form- und Lagetoleranzen im Bereich zwischen 1  $\mu\text{m}$  bis 5  $\mu\text{m}$ . Dies ließ sich nur durch Integration von Messtechnik in die Fertigungsmaschinen realisieren, da das Ein- und Ausspannen der Testmassen zu unzulässigen Fehlern geführt hätte.

Mit der im Bild dargestellten Messanordnung konnten die Konturen der Testmasse gemessen

und die noch erforderlichen weiteren Fertigungsschritte ermittelt werden. Um den möglichen Achsfehler zu eliminieren, wurde dieser Messaufbau unter Nutzung von kalibrierten Maßverkörperungen, die ebenfalls in die Fertigungsmaschine integriert wurden, kalibriert.

Nur mit dieser fertigungsintegrierten Messtechnik, abgestützt auf integrierte, kalibrierte Normale sowie auf zusätzliche Messergebnisse der gefertigten Komponenten, bestimmt mittels spezieller Koordinatenmessgeräte, war es möglich, die außergewöhnlichen Anforderungen an die Fertigungsgenauigkeit zu erfüllen. Diese Untersuchungen haben gezeigt, dass durch Integration von dimensioneller Messtechnik in die Werkzeugmaschine eine wesentliche Reduktion der Fertigungstoleranzen möglich ist. Der Messaufbau ist universell ausgelegt und kann für andere Bauteilgeometrien genutzt werden. So kann unter anderem auch der Werkzeugverschleiß bei der Fertigung kompensiert werden. Um diese Entwicklungen in eine industrielle Anwendung überführen zu können, müssen insbesondere die Aspekte der Maschinensteuerung und der Bauteilreinigung vor einem Messzyklus beachtet werden. ■

\* Dr. Daniel Hagedorn,  
Arbeitsgruppe „Oberflächentechnologie“  
E-Mail:  
daniel.hagedorn@ptb.de



3-mm-Tastsensoren zur Messung der Position und Tiefe von Senkungen an der Testmasse





# Metrologie für die Gesundheit

Herbert Janßen\*, Hans Koch\*\*

Mit dem Thema Gesundheit beschäftigt sich praktisch jeder Mensch mehr oder weniger intensiv andauernd. Es ist ein Thema, das über die individuelle Sorge um das eigene gesundheitliche Wohlergehen eine besondere gesellschaftspolitische Bedeutung hat, ein Thema, bei dem es nicht nur um das Verhältnis zwischen Mensch und Medizin, Patient und Arzt geht. Die gesellschaftlichen Aspekte liegen auch in der Gestaltung unserer Lebensbedingungen, besonders der Randbedingungen, denen wir in der Arbeitswelt unterliegen und dem Erhalt der Umwelt. Hier sind es die vorsorglichen (gesetzlichen) Regelungen, die indirekt zur Verbesserung der gesundheitlichen Situation des Einzelnen beitragen.

Dementsprechend gilt das Thema Gesundheit als eines der wichtigen Zukunftsfelder deutscher und internationaler Forschungs- und Entwicklungspolitik, und es war ein konsequenter Schritt, die Metrologie für die Gesundheit als eine der großen Herausforderungen zukünftiger Schwerpunktsetzungen für die europäischen Metrologieinstitute (NMI) zu identifizieren. Dieses nicht etwa, weil das Thema gerade in Mode ist, sondern weil offensichtlich geworden ist, dass die Lebenswissenschaften, die Medizin und die Medizintechnikindustrie dringend eine metrologische Fundierung benötigen, die über traditionelle Konzepte hinausreicht.

Während für die traditionellen Disziplinen der Metrologie eine über Jahrzehnte gewachsene und bewährte europäische Struktur in Form von EURAMET und dessen technischen Komitees existiert, ergab sich in der Phase der Formulierung des speziell für metrologische Fragestellungen konzipierten European Metrology Research Programme (EMRP) die Notwendigkeit, für die neuen Querschnittsthemen äquivalente Netzwerkstrukturen aufzubauen.

Dies geschah durch Bildung einer Fokusgruppe „Metrologie für die Lebenswissenschaften“, in der die relevanten Expertisen der europäischen NMIs gebündelt und Roadmaps entwickelt wurden. Zusätzlich wurde der Bedarf an metrologischer Unterstützung aus den Bereichen Politik, Industrie, klinischer Praxis und gesellschaftlichen Anforderungen ermittelt und einbezogen. Dabei stellte sich – allerdings nicht überraschend – heraus, dass der Bedarf extrem vielfältig und schwer einzuordnen ist.

In der ersten Phase des EMRP wurden im Jahre 2007 sechs Projektvorschläge von europäischen Metrologieinstituten aus dem Bereich Gesundheit für die Förderung durch die Europäische Kommission ausgewählt. Dabei kamen nur Projektvorschläge zur Auswahl, bei denen komplementäre Expertisen mehrerer NMIs attraktiv kombiniert werden konnten und zu erwarten war, dass für konkrete metrologische Herausforderungen mit Hilfe des Programms wichtige Beiträge für die medizinische Diagnostik, die Therapie und die Früherkennung erzielt werden können, von denen die Patienten, mit anderen Worten wir alle, profitieren.

## Rahmenbedingungen und Herausforderungen

Metrologie für die Gesundheit unterscheidet sich in mehrfacher Hinsicht von traditionellen metrologischen Herangehensweisen: Das Messobjekt ist letztendlich der Mensch. Selbst wenn – zum Beispiel in der klinischen Chemie – Labormessungen durchgeführt werden, wirken sich die Resultate und die daraus abgeleiteten Konsequenzen unmittelbar auf einen Menschen aus. Entsprechend müssen ethische Gesichtspunkte und Verantwortlichkeiten besonders ernst genommen werden. Man darf nicht alles messen, was messbar ist.

Weiterhin ist die oberste Maxime auf diesem Gebiet der Metrologie nicht – wie in vielen anderen Bereichen – Präzisionsmessung bis hinein in messtechnische Grenzbereiche. Vielmehr steht das im buchstäblichen Sinne „vitale“ Ziel im Vordergrund, **Vergleichbarkeit** von Messungen zu gewährleisten. In diesem Geiste sind oft neu entwickelte Referenzmessverfahren relevanter als der Wert einzelner physikalischer Messgrößen. So ist es zum Beispiel beim Elektrokardiogramm-Signal (EKG) nicht essentiell, hochpräzise Spannung und Zeit zu bestimmen, sondern die Messsignale so zu analysieren, dass ein **vergleichbares** Ergebnis als EKG-Diagnose ermittelt wird.

Es gibt – glücklicherweise – keinen Standardmenschen. Daher muss ein „Normal“ in der Metrologie für die Lebenswissenschaften die Aspekte der enormen Biovariabilität, der Nichtwiederholbarkeit und geringen Reproduzierbarkeit von Messungen, der unscharfen Definitionen (was

\* Dr. Herbert Janßen  
Abteilung „Ionisierende Strahlung“  
E-Mail:  
herbert.janssen@ptb.de,

\*\* Prof. Dr. Hans Koch,  
Abteilung „Medizinphysik und metrologische Informationstechnik“  
E-Mail:  
hans.koch@ptb.de

ist physiologisch, was pathologisch) und andere Dinge mehr berücksichtigen. Oft sind nur indirekte, nicht-invasive Messungen möglich, die von vielen unkontrollierbaren Einflussgrößen und unbekanntem Parametern begleitet sind.

An der Metrologie für die Gesundheit sind häufig die unterschiedlichsten wissenschaftlichen Disziplinen beteiligt, die sonst selten miteinander kommunizieren. Diese inhärente Diversität wurde auch in den EMRP-Projektvorschlägen überdeutlich. Forschungs- und Entwicklungsthemen spannten sich auf von Thermometrie, Kernspinresonanz, Laseranwendungen, ionisierender Strahlung und Ultraschall bis zu Chemie und Biochemie; die medizinischen Kategorien von „Homecare“, Diagnostik, Therapie, regenerativer Medizin und klinischer Forschung bis zu „Proteomics“. Krankheitsbilder sind unter anderem Herz-Kreislauf-Probleme, Krebs und dazu Aspekte einer alternden Gesellschaft. Es geht um Einzelmolekülnachweis, große Maschinen und virtuelle Menschen.

Die Auswahl der bewilligten Projekte ist demgegenüber schon deutlich eingeschränkt und kann daher nur als Etablierung erster Schritte für eine zunehmend breitere Rolle einer zukünftigen, europäisch vernetzten Metrologie für die Gesundheit gelten. Als logische Konsequenz aus den bisherigen Erfahrungen wird das europäische Metrologie-Forschungsprogramm erneut spezifisch auf Gesundheit ausgerichtete Forschungs- und Entwicklungsprojekte auflegen, die für die Arbeitsgruppen der PTB neue Herausforderungen darstellen, für die wiederum ein erheblicher Teil der Ressourcen aufgewendet werden wird.

Nach einem kurzen Abriss der Verbundprojekte aus dem Bereich Gesundheit, an denen auch Arbeitsgruppen der PTB zur Zeit maßgeblich beteiligt sind, folgen weitere Beiträge mit typischen Beispielen, die einen kleinen, aber bei weitem nicht umfassenden, Einblick in die metrologischen Arbeiten der PTB aus diesem Bereich bieten.

#### **Atemgasanalyse als diagnostisches Werkzeug für die Früherkennung von Krankheiten**

In diesem Projekt wurde die Methode der Laserabsorptionsspektroskopie im Hinblick auf ihr Potential zur verlässlichen Früherkennung diverser Krankheitsbilder untersucht. Insbesondere sollen die Nachweisgrenzen und Messunsicherheiten verbessert werden. Für die beteiligten NMIs steht dabei die Bereitstellung metrologisch fundierter Referenzmessungen im Vordergrund. Für spektrometrisch arbeitende Atemdiagnoseinstrumente soll so eine metrologische Basis geliefert werden. Unterthemen sind die Präparation von Referenzgasmischungen, Linienstärkenmessungen und die Untersuchung des Einflusses von Interferenzen, insbesondere von Feuchtigkeit und CO<sub>2</sub>. Ausgehend von anspruchs-

vollen Messaufbauten nach dem Stand der Technik sollen Bezugspunkte geliefert werden, die für Geräte in der Breite einsetzbar sind.

#### **Verbesserung der Wirksamkeit von Krebsbehandlungen mittels 3D-Brachytherapien**

Ziele dieses Projektes sind einerseits die Entwicklung neuer Rückführungsketten zu Primärnormalen für die von Bestrahlungsquellen absorbierte Dosis bei der Brachytherapie und andererseits die Erarbeitung von Beiträgen zum besseren Verständnis dreidimensionaler Dosisverteilungen in Patienten. Letztendlich soll eine relative Unsicherheit von kleiner 5 % für die Bestimmung der absorbierten Dosis im Zielvolumen erreicht werden, um das Optimum an therapeutischer Wirkung einerseits und Patientensicherheit andererseits gewährleisten zu können.

#### **Metrologie für die Krebstherapie mit Strahlen**

Dieses Verbundvorhaben zeichnet sich dadurch aus, dass zwei gänzlich verschiedene Strahltherapien auf der Grundlage von ionisierender Strahlung (Elektronen, Protonen, Schwerionen) einerseits und von intensivem Ultraschall andererseits metrologisch miteinander in Beziehung gesetzt werden. Der Reiz dieses Ansatzes ist das Zusammenführen zweier metrologischer Kulturen, die sich gegenseitig befruchten können. Während für die Ultraschalltherapien viele grundsätzliche Fragen, wie z. B. Temperaturverteilungen und Kavitationserscheinungen, messtechnisch erschlossen werden müssen, geht es bei der Tomotherapie mit ionisierender Strahlung darum, die deponierte Dosis in kleinen und irregulär geformten Strahlungsfeldern genauer zu bestimmen und vor allen Dingen die Rückführung der Dosimetrie für diese Anwendung in der klinischen Praxis zu sichern.

#### **Rückführung komplexer diagnostischer Biomoleküle und Biomarker**

In der klinischen Chemie werden in rapide zunehmendem Umfang diverse Biomarker eingesetzt, häufig sind dies hochkomplexe Biomoleküle. Auf diesem Gebiet die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, ist eine äußerst anspruchsvolle Herausforderung, die in diesem Vorhaben methodisch aufbauend angegangen wird. Der Bezug zu existierenden Standards liefert oft unzureichende und methodenabhängige Resultate. Ein wesentlicher Schritt ist die Verknüpfung des derzeitigen WHO-Systems der „internationalen Einheiten“ mit dem grundlegenden SI-System mit Hilfe metrologisch fundierter, physikalisch-chemischer Techniken, z. B. massenspektrometrischer

Isotopen-Verhältnismessungen, zur Bestimmung der Einheiten „Stoffmenge“ und „biologische Aktivität“.

### Rückführbare Messergebnisse der klinischen Chemie für Biospezies und Ionenaktivität

Die Quantifizierung von Elementkonzentrationen in Blutserum gehört zu den häufigsten Untersuchungen der klinischen Chemie. International anerkannte Referenzmessverfahren für die Rückführung solcher Messungen existieren für die Bestimmung der Gesamtgehalte der wichtigsten Elemente. Zunehmend wichtig ist jedoch zusätzlich die Bestimmung der Stoffmenge der klinisch aktiven Form eines bestimmten Elements. Herauszuhebende Beispiele sind Selenspezies, die in Kombination mit Chemotherapien die Wirksamkeit von Krebsbehandlungen verbessern. Ein Ziel des Projekts ist die Quantifizierung der wichtigen Spezies in den sehr engen, klinisch wirksamen Konzentrationsbereichen.

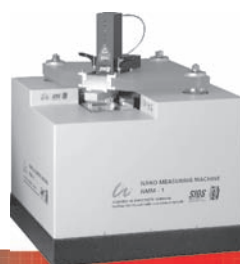
In ähnlicher Weise sind manchmal nur die ionisierten Formen eines Analyten wirksam. Hier werden im Projekt z. B. Methoden zur Rückführbarkeit von ionisiertem Calcium entwickelt. Gerade bei schwerstkranken Menschen ist die Messung des ionischen Calciums von entscheidender Bedeutung.

### Metrologie für die regenerative Medizin

Große Hoffnungen und Erwartungen werden derzeit in die Entwicklung neuer Behandlungsmöglichkeiten von Verletzungen oder von bestimmten Erkrankungen durch künstlich hergestellte zelluläre oder gewebeartige Transplantate gesetzt. Trotz erheblicher Forschungsanstrengungen und dabei erzielter beachtlicher Erfolge konnte jedoch das Potential dieser viel versprechenden Ansätze für eine personalisierte medizinische Versorgung bislang nur in geringem Maße und nur langsam umgesetzt werden. Dieses liegt ganz wesentlich auch daran, dass es keine international akzeptierten messtechnischen Verfahren, Vorgehensweisen und Standards für Qualitäts- und Sicherheitskontrollen von Produkten der regenerativen Medizin gibt. Die Projektziele zu diesem Thema sind dementsprechend darauf ausgerichtet, exemplarisch Wege aufzuzeigen, wie diese Lücken geschlossen werden können. Schwerpunkte der Arbeiten sind die Entwicklung durchflusszytometrischer Messverfahren zur Charakterisierung, Zählung und Anreicherung von Stammzellen aus peripherem Blut sowie die Entwicklung von quantitativen 3D-Bildgebungsverfahren zur Charakterisierung und Kontrolle von Zellen auf Oberflächen und Stützgerüsten zur Züchtung von künstlichem Gewebe. ■

### Nanopositionier- und Nanomessmaschine NMM-1

- Dreidimensionales, hochgenaues Positioniersystem
- Mess- und Positionierbereich: 25 mm x 25 mm x 5 mm
- Auflösung: 0,1 nm, • kundenspezifische Antastsensoren



**SIOS Meßtechnik GmbH**  
Am Vogelherd 46  
D-98693 Ilmenau  
Tel.: 03677/6447-0  
E-mail: info@sios.de  
www.sios.de

**SIOS**   
Meßtechnik GmbH



## Dosimetrie für nicht-ionisierende Strahlung

**Thomas Kleine-Ostmann\***

Auch nicht-ionisierende elektromagnetische Strahlung, deren Quantenenergie nicht ausreicht, um chemische Bindungen in biologischen Molekülen aufzubrechen, kann für den lebenden Organismus gefährlich werden. Unbestritten sind thermische Wirkungen, die darauf beruhen, dass die Energie des Feldes in Wärme umgesetzt wird. Darüber hinaus ist nach wie vor unklar, ob nicht-ionisierende Strahlung mit Leistungsdichten unterhalb der thermischen Schädigungsgrenze nachteilige Wirkungen haben kann. Ein geeignetes Maß für die Stärke der Exposition, sowohl bei der Beurteilung von Personenexpositionen als auch bei Expositionsexperimenten mit Zelllinien, ist die spezifische Absorptionsrate (SAR), die angibt, wie viel Leistung pro Kilogramm in Wärme umgesetzt wird.

Die messtechnische Erfassung dieser Größe ist nur bedingt möglich. Um die Wirkung von mobilen Sendeeinrichtungen (z. B. Mobiltelefonen) zu erfassen, werden sogenannte Körperphantome verwendet, deren Absorptionsverhalten dem des menschlichen Körpers nachempfunden ist und deren Flüssigkeitsfüllung im Inneren die Messung mit Hilfe eines SAR-Sensors ermöglicht. Im Rahmen des von der EU im Programm iMERA-plus geförderten Projektes „Traceable measurement of field strength and SAR for the Physical Agents Directive“, wurde an der PTB ein Verfahren für die Kalibrierung von Sensoren im Frequenzbereich zwischen 6 GHz und 10 GHz entwickelt (Bild 1) und damit der Frequenzbereich erweitert, in dem rückgeführte Messungen dieser Größe möglich sind.

Die Messung der SAR scheidet bei hohen Frequenzen oberhalb von etwa 10 GHz aufgrund der Größe der Feldsensoren. Bei Expositionsexperimenten mit Zelllinien, die oftmals in Form sehr dünner Schichten kultiviert werden, kann die

spezifische Absorptionsrate auch bei niedrigeren Frequenzen so nicht gemessen werden. Trotzdem ist die Angabe der SAR sinnvoll, um beispielsweise Feldexpositionsexperimente quantitativ bewerten zu können. In diesem Fall muss die spezifische Absorptionsrate mit Hilfe von Feldberechnungsverfahren numerisch ermittelt werden. Im Rahmen des vom Bundesamt für Strahlenschutz geförderten Projektes „Gentoxische Effekte von THz-Strahlung in vitro“, in dem unter definierten Umgebungsbedingungen zwei unterschiedliche Hautzelltypen (HaCaT Keratinozyten und primäre Hautfibroblasten) kontinuierlicher THz-Strahlung bei sechs verschiedenen Frequenzen zwischen 100 GHz und 2,52 THz ausgesetzt wurden [1], konnte so die genaue Feldverteilung in den Proben ermittelt werden (Bild 2). ■

[1] C. Jastrow, T. Kleine-Ostmann, und T. Schrader: Numerische Feldberechnungen für die Dosimetrie bei Feldexpositionen in vitro im THz-Frequenzbereich. PTB-Mitteilungen **120**, (2010), Heft 3, 28–33.

\* Dr. Thomas Kleine-Ostmann, Arbeitsgruppe „Elektromagnetische Felder und Antennenmesstechnik“  
E-Mail: thomas.kleine-ostmann@ptb.de

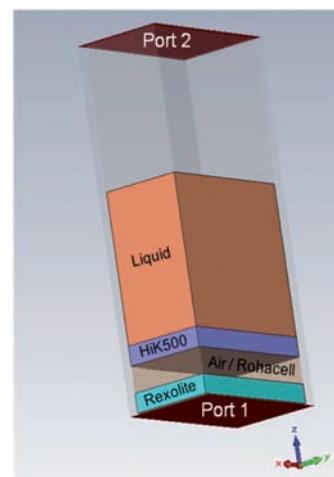
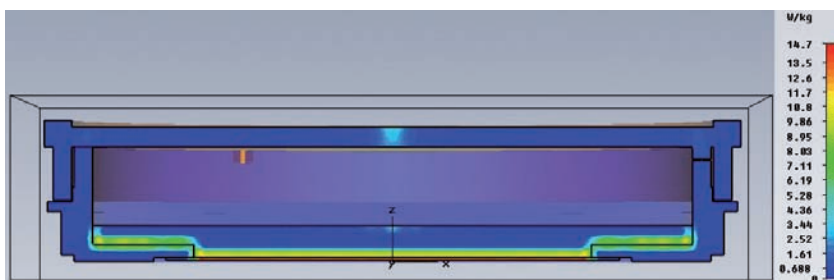


Bild 1: Modell für die numerische Berechnung des SAR-Wertes in der Kalibrierapparatur

Bild 2: Berechnung der spezifischen Absorptionsrate bei 106 GHz in einem Probencontainer für die Feldexposition von Hautzelllinien. Die Zellen befinden sich auf einer dünnen Kunststoffolie am Boden des Probencontainers und werden von unten mit einer ebenen Welle einer Leistungsdichte von 2 mW/cm<sup>2</sup> bestrahlt.



## Hochintensiver therapeutischer Ultraschall: Lokale Hitze für den (Tumor-) Zelltod

Julian Haller\*, Volker Wilkens, Sven Sonntag, Christian Koch

Die quantitative Beschreibung der für therapeutische Zwecke eingesetzten Ultraschallfelder ist eine notwendige Voraussetzung, um die therapeutische Wirkung abschätzen, den Ablauf der Therapie planen und Sicherheitsrisiken für umliegendes gesundes Gewebe beurteilen zu können. Aufgrund der Leistungen und Temperaturen, der extrem schnellen Erwärmung und der Gefahr des Auftretens von Kavitation sind hierfür nicht-alltägliche Messmethoden notwendig.

Erste Voraussetzung für eine quantitative Abschätzung ist die Notwendigkeit, die gesamte in Wasser abgegebene Ultraschalleistung zu bestimmen, die bei klinischen Geräten bis zu 400 W betragen kann. In der PTB wurde dafür eine Messmethode auf Basis der Bestimmung der Schallstrahlungskraft entwickelt und realisiert. Damit können nahezu alle im Moment verwendeten Quellen vermessen werden. Für eine genaue Bestimmung der Temperaturverteilung ist aber die Kenntnis

der räumlichen Schallfeldverteilung notwendig. Es werden Schalldrucksensoren benötigt, die den extremen Bedingungen gewachsen sind (Bild 1). Alternativ wurden auch Sensoren entwickelt, die die Erwärmung in einem Probekörper messen und mit der akustischen Intensität verknüpfen.

Haupthindernis für den Einsatz der neuen Technik ist die Schwierigkeit, vom Behandlungsort Informationen über den Stand der Koagulation zu erhalten. Deshalb werden viele Operationen unter Kontrolle mittels Magnetresonanztomographie (MRT) durchgeführt, wodurch die Temperatur online bestimmt werden kann. Allerdings hängt die Genauigkeit extrem vom Gerät und dessen Einstellungen ab. Um die Genauigkeit der MRT-Temperaturmessung vor Ort ermitteln zu können, wurde ein Phantom entwickelt (Bild 2), das genau definierte Temperaturfelder und Erwärmungsgeschwindigkeiten erzeugt, die gemessen und verglichen werden können. ■

Krebs ist europaweit die zweithäufigste Todesursache, und die Suche nach Therapien erstreckt sich auf ein weites Feld physikalischer und chemischer Methoden. Bestrahlung mit ionisierenden Strahlen, zurzeit oft das Mittel der Wahl, führt zu erheblicher Strahlenbelastung für umliegendes gesundes Gewebe. Neue Methoden auf Basis von Ultraschall vermeiden dies und können durch den Einsatz starker fokussierter Felder eine lokale Erwärmung des Tumorgewebes auf weit über 60 °C erzeugen. Dadurch sterben die Zellen ab (Koagulation) und werden wie bei Apoptose-Prozessen abgebaut.



Bild 1:

In der PTB neu entwickelte Sensoren, die für räumlich auflösende Messungen von hochintensiven Ultraschallfeldern geeignet sind: Membranhydrophon zur Messung von Schallwechseldruckverteilungen (links) und thermischer Sensor (rechts).

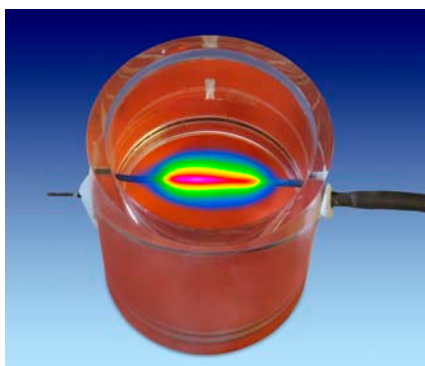


Bild 2:

Phantom zur Prüfung von MRT-Geräten: Ein koaxialer Widerstand (schwarz) erzeugt in einem Medium (hier Wasser) eine definierte Temperaturverteilung (hier farblich symbolisiert).

\* Dr. Julian Haller,  
Arbeitsgruppe  
„Ultraschall“  
E-Mail:  
julian.haller@ptb.de

## Wasserkalorimetrie für die Dosimetrie in der Strahlentherapie

Achim Krauss\*

Messgröße in der Dosimetrie für die Strahlentherapie ist die sogenannte Wasser-Energiedosis  $D_w$ . In der PTB wird die Einheit dieser Messgröße, das Gray (Gy;  $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$ ), mit Hilfe eines Wasserkalorimeters bei  $^{60}\text{Co}$ -Strahlung unter Referenzbedingungen mit einer Standardmessunsicherheit von 0,2 % dargestellt. Rückführbar auf die Messungen mit diesem Primärnormal werden Gebrauchsdosimeter (z. B. Ionisationskammern), die in den strahlentherapeutischen Kliniken Verwendung finden, in Einheiten der Wasser-Energiedosis kalibriert.

Die Wasserkalorimetrie basiert auf der Messung der strahlungsinduzierten Temperaturerhöhung  $\Delta T$  an einem Messort im Wasserphantom, wobei  $\Delta T$  nur ca. 0,24 mK/Gy beträgt. Voraussetzung zur präzisen Messung dieser Temperaturerhöhung ist eine sehr gute thermische Isolation und eine aktive Temperaturstabilisierung des gesamten Kalorime-

ters, da das Wasserkalorimeter bei einer Temperatur von 4 °C betrieben wird. Gemessen wird die strahlungsinduzierte Temperaturerhöhung mit Hilfe von temperaturkalibrierten Thermistoren, die in der Spitze dünner Glaspipetten (Durchmesser ca. 0,5 mm) eingeschmolzen sind.

Da die Wasserkalorimetrie prinzipiell ein von der Energie der Strahlung unabhängiges Messverfahren ist, lassen sich damit z. B. auch die in der Dosimetrie hochenergetischer Photonen- und Elektronenstrahlung benötigten energieabhängigen Korrekturfaktoren ( $k_Q$ -Faktoren) von Ionisationskammern experimentell bestimmen. Darüber hinaus liefert die Wasserkalorimetrie wertvolle Beiträge zu aktuellen Fragestellungen in der Dosimetrie, z. B. zur Dosimetrie in kleinen Strahlungsfeldern, die heutzutage in zunehmendem Maße in der Strahlentherapie Anwendung finden. ■

\* Dr. Achim Krauss,  
Arbeitsgruppe  
„Einheit der Wasser-  
Energiedosis“  
E-Mail:  
achim.krauss@ptb.de

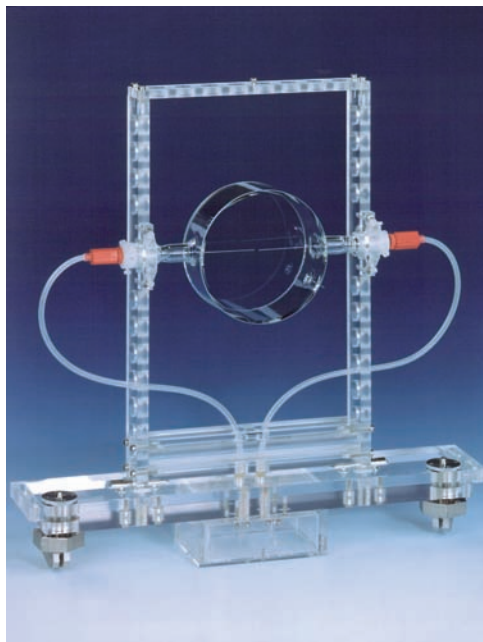


Bild 1:  
Der Detektor des Wasserkalorimeters. Die zur Messung der Temperaturerhöhung verwendeten Thermistoren befinden sich in der Spitze dünner Glaspipetten, die gegenüberliegend in einem mit hochreinem Wasser gefüllten Glaszylinder montiert sind.



Bild 2:  
Das Wasserkalorimeter vor dem Strahlerkopf des medizinischen Beschleunigers der PTB. Das Außengehäuse (Kantenlänge ca. 1 m) dient zur Temperaturstabilisierung des bei 4°C betriebenen Kalorimeters. Das rot umrandete Feld markiert das Strahlungseintrittsfenster des Kalorimeters.

## Strahlenschutzdosimetrie für gepulste Photonen-Strahlungsfelder

Oliver Hupe\*

Zum Gesundheitsschutz derjenigen Personen, die beruflich ionisierender Strahlung ausgesetzt sind, ist die Messung der Dosis gesetzlich vorgeschrieben. Die zu verwendenden Messgeräte, die Orts- und Personendosimeter, unterliegen an den meisten Arbeitsplätzen der Eichordnung und bedürfen daher einer Bauartprüfung und Zulassung durch die PTB. Wenn diese nur national gültige Bauartzulassung mit den internationalen Normen im Einklang ist, findet sie auch international Anerkennung und wird als Qualitätsnachweis für das Dosimeter angesehen. Dies wird durch die aktive Mitarbeit in den internationalen Normungsgremien sichergestellt.

Mittlerweile werden für die Messung der Dosis vermehrt elektronische Dosimeter mit direkter Anzeige und Alarmfunktion eingesetzt. Die überwiegende Zahl der etwa 340 000 beruflich strahlenexponierten Personen in Deutschland arbeitet im medizinischen Bereich, dort sind die meisten Strahlungsfelder gepulst. Bei Messungen in derartigen Feldern stieß die PTB 2007 darauf, dass elektronische Dosimeter jedoch nur bedingt verlässlich messen. Der Grund liegt im Messprinzip, der meist zählenden Messung.

Da es bezüglich gepulster Strahlung bisher keinerlei Prüfungen oder Anforderungen an Dosime-

ter gab – weder national noch international –, war ein Handeln der PTB dringend erforderlich. Bei den Anlagen im medizinischen Bereich werden die Parameter der Strahlungspulse nicht in physikalischen Größen wie Strom und Spannung eingestellt, sondern anhand der geforderten Bildqualität. Daher bestand die Herausforderung bei der Entwicklung der entsprechenden Prüfanlage darin, die für die Prüfung von Dosimetern notwendigen physikalischen Parameter (unabhängig) einstellbar zu machen. Die so entstandene Anlage ist weltweit die erste und einzige Anlage, die dies erlaubt.

Der zweite wichtige Schritt ist die internationale Festlegung von Prüfanforderungen an Strahlenschutz-Dosimeter in IEC-Normen und der entsprechenden Referenz- bzw. Prüffelder in ISO-Normen. Für beides wurden von Deutschland Normungsvorschläge eingebracht, gefördert aus dem Programm „Innovation mit Normen und Standards (INS)“.

In Bild 1 ist jeweils ein Beispiel für ein Orts- und ein Personendosimeter gezeigt. Bild 2 zeigt den typischen Einsatzort von Personendosimetern im medizinischen Bereich der Röntgendiagnostik. Der vorgeschriebene Trageort ist unter der Schutzkleidung, diese wurde daher im Bereich der Dosimeter transparent dargestellt. ■

\* Dr. Oliver Hupe,  
Arbeitsgruppe  
„Photonendosimetrie“  
E-Mail:  
oliver.hupe@ptb.de



Bild 1:  
Beispiel für ein Orts- und ein Personendosimeter



Bild 2:  
Typischer Einsatzort von Personendosimetern



## Strahlenbiologische Experimente an lebenden Zellen

Ulrich Giesen\*

Der Microbeam (Mikro-Ionenstrahl) hat sich als eine spezielle Anlage für die Erforschung von Phänomenen im niedrigen Dosisbereich, wie z. B. den Bystander-Effekten [1] und die direkte Beobachtung von sekundenschnellen Strahlenreaktion in lebenden Zellen, mit dem „Live-cell Imaging“ etabliert.

Mit der Microbeam-Anlage werden die Strahlen von Protonen oder Alphateilchen der Ionenbeschleuniger-Anlage der PTB (PIAF) auf einen Durchmesser von nur 2–3 µm fokussiert [2]. Damit lassen sich nicht nur gezielt die Zellkerne mit einem Durchmesser von ca. 6–12 µm oder das umliegende Zytoplasma von lebenden Zellen bestrahlen, sondern es wird zudem die Anzahl der Teilchen pro Zelle durch einen schnellen Deflektor präzise kontrolliert. Bei einer niedrigen makroskopischen Dosis variiert bei den üblichen Strahlenquellen die Anzahl der Treffer nach der Poisson-Verteilung z. B. von 0–3 Teilchen pro Zellkern, wodurch die Strahlenwirkung über einen weiten Bereich an Schädigungen gemittelt wird. Mit der Microbeam-Technik wird dagegen jeder Zellkern wunschgemäß z. B. von einem Alphateilchen getroffen.

Wichtige Parameter für Strahlentherapie und Strahlenschutz sind die *relative biologische Wirksamkeit* (RBE) und der Strahlungs-Wichtungsfaktor  $w_R$ , die für verschiedene Strahlenqualitäten jeweils sehr unterschiedlich sind [3]. Mit dem

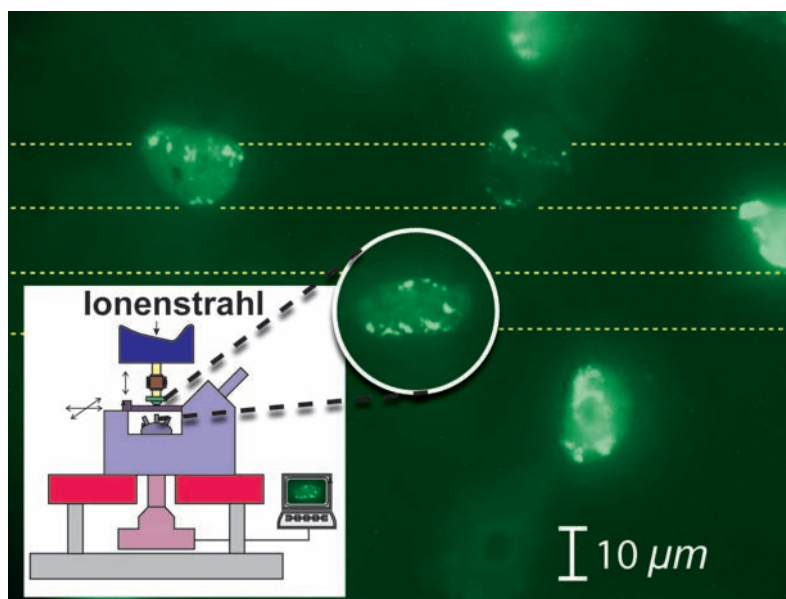
Microbeam werden die Wirkung von dicht ionisierenden Alphateilchen, mit einem hohen LET (Linear Energy Transfer), wie z. B. beim Radonzerfall, und die Wirkung von locker ionisierenden Protonen mit einem niedrigen LET, wie z. B. bei Röntgenstrahlung, untersucht [4]. Typische biologische Messgrößen sind das klonale Überleben oder die Auswertung von Anzahl und Muster von Chromosomenschäden.

In Kombination mit molekularbiologischen Methoden werden aktuell die Reaktionen von Zellen an durch Strahlung induzierten Doppelstrangbrüchen der DNA untersucht. Um die Schäden und die Prozesse der Reparatur in den Zellen sichtbar zu machen, wird hierzu ein Reparaturprotein gentechnisch mit einer Fluoreszenz markiert, sodass ein exklusives Beobachten dieses Proteins möglich ist. Sammeln sich die Reparaturproteine nun innerhalb von Sekunden oder Minuten nach Bestrahlung an den Doppelstrangbrüchen, können sie als leuchtende Punkte, sogenannte Foci, „live“ unter dem Mikroskop beobachtet werden (siehe Bild) [6]. Das Verfahren des „Live-cell Imaging“ soll sowohl Aufschluss über Strahlenschäden und die Abfolge und Geschwindigkeit [6] von verschiedenen Reparaturmechanismen in den Zellen bringen als auch zeigen, inwiefern Medikamente diese Prozesse beeinflussen könnten. ■

(Danksagung und Literatur auf Seite 55)

\* Dr. Ulrich Giesen, Arbeitsgruppe „Mikro-Ionenstrahl und Ionendosimetrie“ E-Mail: ulrich.giesen@ptb.de

Am Microbeam wurden menschliche Zellen in einem Muster mit  $\alpha$ -Teilchen bestrahlt (Linienabstand 10 µm, Trefferabstand ca. 1 µm, symbolisiert durch die gelben Punkte). Entlang der Teilchenspur entstehen Doppelstrangbrüche in der DNA. Auf dem Bild leuchten sie, weil sich fluoreszenzmarkierte Reparaturproteine an den Bruchstellen sammeln.



## Klinische Ultrahochfeld-Magnetresonanztomographie (UHF-MRT) – eine metrologische Herausforderung

Frank Seifert\*

Die Kernspintomographie (auch Magnetresonanztomographie, MRT, MRI) ist eine attraktive diagnostische Methode, da sie ohne ionisierende Strahlung Schnittbilder beliebiger Orientierung des gesamten Körpers mit hervorragendem Weichteilkontrast liefert. Sie fand Anfang der 80er Jahre Eingang in die medizinische Routine. Derzeit werden weltweit rund 70 Mio. MRT-Untersuchungen pro Jahr durchgeführt.

In klinischen MRTs werden derzeit Magnetfelder von bis zu 3 Tesla eingesetzt. Der Trend geht jedoch zu noch weit höheren Feldern von z. B. 7 Tesla, mit der vielversprechenden Aussicht, neue diagnostische Möglichkeiten zu erschließen. Dabei auftretende Ausbreitungsphänomene elektromagnetischer Felder im menschlichen Körper bedingen prinzipiell neuartige MR-Bildgebungsverfahren und damit verbunden auch die Entwicklung neuer messtechnischer Konzepte zur Gewährleistung der Patientensicherheit.

Die MRT des menschlichen Körpers beruht auf der Abbildung seiner Wasserprotonen. Dazu wird mit Hilfe einer Hochfrequenzspule ein zusätzliches Magnetfeld eingestrahlt. Bei der UHF-MRT ist die

Wellenlänge dieser elektromagnetischen Strahlung jedoch so kurz, dass Ausbreitungsphänomene im Körper zu inhomogen ausgeleuchteten MRT Bildern führen. Außerdem absorbiert der Körper die Strahlung und erwärmt sich dabei, ein Effekt, der mit der spezifischen Absorptionsrate (SAR) beschrieben wird, die zum Schutz des Patienten bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten darf. Der Inhomogenität im UHF-MRT-Bild kann mit ausgeklügelten mehrkanaligen Anregungsverfahren begegnet werden, wobei vielkanalige Sendespulen-Arrays zum Einsatz kommen. Allerdings ist es aufgrund der Komplexität des Verfahrens deutlich schwieriger, die Kontrolle der SAR zu bewerkstelligen. Die PTB entwickelt daher neuartige Messverfahren zur Validierung von Simulationsrechnungen, die die Bestimmung der komplexen zeitlichen Verläufe von elektromagnetischen Feldkomponenten in Phantomen oder im menschlichen Körper gestatten. Damit werden auch die Grundlagen für zukünftige normative Regelungen im Bereich der MRT-Sicherheit gelegt sowie unser Wissen über Ausbreitung und Effekte elektromagnetischer Felder im menschlichen Körper vertieft. ■

\* Dr. Frank Seifert,  
Arbeitsgruppe  
„MR-Messtechnik“  
E-Mail:  
frank.seifert@ptb.de



3-Tesla MRT der PTB in Berlin-Charlottenburg



7-Tesla-Tomograph auf dem Campus Berlin-Buch. Er wird gemeinsam mit dem Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin und der Charité betrieben.

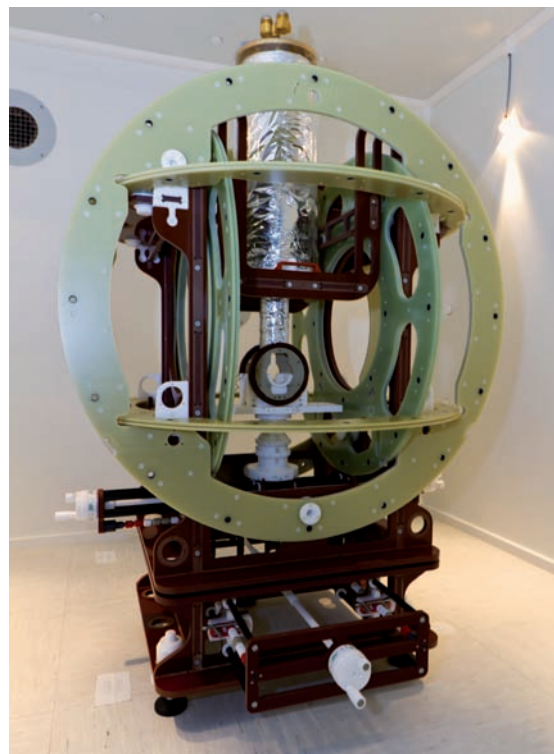
## Niedrigfeld-Magnetresonanz

**Martin Burghoff\***

Kernspinresonanzmessungen werden seit vielen Jahren erfolgreich in der Medizin und der Forschung eingesetzt. Beispielsweise können in einem Kernspintomografen sehr hoch auflösende anatomische Bilder vom menschlichen Gehirn angefertigt werden. Kernspinresonanzmessungen können auch in sehr niedrigen Feldern durchgeführt werden. Wenn die angelegten Felder in die Größenordnung des Erdmagnetfelds kommen oder noch schwächer sind, ist es zweckmäßig, die Messungen in einer magnetischen Schirmung wie dem Berliner Magnetischen Abschirmraum 2 (BMSR-2) durchzuführen. Zur Signalaufnahme im Bereich sehr niedriger Felder werden supraleitende Magnetfelddetektoren (SQUIDs) verwendet, die auch für Resonanzfrequenzen unterhalb von einem Kilohertz die erforderliche Empfindlichkeit aufweisen. Im Fachbereich Biosignale wurde hierzu ein SQUID-Messplatz aufgebaut, der kombinierte Messungen der  $T_1$ - und der  $T_2$ -Relaxationszeit in niedrigen Feldern unterhalb von  $1 \mu\text{T}$  ermöglicht [1, 2].

Mit diesem Aufbau wurde zunächst untersucht, wie sich die Eigenschaften des Messsystems, auf die NMR-Linien auswirken. Nachdem diese messtechnischen Effekte verstanden waren, wurde der physikalische Hintergrund des NMR-Signals von Flüssigkeiten im niedrigen Feld untersucht. Für Wasser im neutralen pH-Bereich ist bereits seit langem bekannt, dass sich die  $T_1$ -Relaxationszeit im niedrigen Feldbereich ändert. Dieses Phänomen spiegelt die Diffusion von  $\text{H}_3\text{O}^+$  und  $\text{OH}^-$ -Ionen wider, die bei extremen pH-Werten weitgehend unterbunden ist. Mit dem neuen Messaufbau konnte durch die kombinierte Messung des Verlaufs von  $T_1$  und  $T_2$  das Relaxationsverhalten von Wasser über einen weiten Frequenzbereich umfassend untersucht werden [2]. Diese Daten geben nicht nur Aufschluss über die molekulare Dynamik in Wasser, sie liefern auch die Hintergrundinformation für die aktuell an der PTB im Aufbau befindliche NMR-Bildgebung im niedrigen Feld [3, 4], die ja zum großen Teil auf dem NMR-Signal von Wasser beruht.

Ein weiteres Forschungsziel der Niedrigfeld-Magnetresonanz an der PTB ist die direkte Messung von neuronalen Strömen mittels NMR. Dabei soll der Effekt ausgenutzt werden, dass neuronale Ströme in ihrer Umgebung ein kleines Magnetfeld aufbauen, das die NMR-Spektrallinien verändert [5]. Diese Veränderung ist dann ein Maß für die neuronalen Ströme. In Kombination mit der Niedrigfeld-NMR-Bildgebung würde dann eine Messmethode zugänglich, die in einem anatomischen Bild gleich die neuronalen Ströme markiert. ■



Blick in eine magnetisch geschirmte Messkabine mit einem System von Helmholtzspulen zur Magnetresonanz-Bildgebung und zur Messung neuronaler Ströme im niedrigen Magnetfeld. Der SQUID-Sensor befindet sich am Boden des mit Aluminiumfolie ummantelten Dewargefäßes.

\* Dr. Martin Burghoff  
Arbeitsgruppe  
„Bioelektrische Messtechnik“  
E-Mail:  
martin.burghoff@  
ptb.de

**Fortsetzung von Seite 52**

Strahlenbiologische Experimente an lebenden Zellen

Ulrich Giesen

**Danksagung**

Die beschriebenen und weitere Untersuchungen werden, bzw. wurden jeweils in Kooperationen mit einem oder mehreren der folgenden Strahlenbiologen durchgeführt:

C. Baumstark-Khan, C. Hellweg, DLR  
 W. G. Dirks, DSMZ, Braunschweig  
 D. Frankenberg, U. Göttingen  
 E. Hausherr, H. P. Rodemann, U. Tübingen  
 C. Mielke, U. Düsseldorf  
 A. Sak, U. Essen  
 S. Schmeißer, M. Gomolka, BfS-München  
 E. Schmid, LMU-München

**Literatur**

- [1] Bystander Experimente, JB2004  
[http://www.ptb.de/de/org/6/nachrichten6/2004/abt6\\_23\\_2004.htm](http://www.ptb.de/de/org/6/nachrichten6/2004/abt6_23_2004.htm)
- [2] K. D. Greif, H. J. Brede, D. Frankenberg, U. Giesen: The PTB single ion microbeam for irradiation of living cells. *Nucl. Instr. and Meth.* **B 217** (2004), 505–512
- [3] M. Frankenberg-Schwager, S. Spieren, E. Pralle, U. Giesen, H. J. Brede, M. Thiemig, and D. Frankenberg: The RBE of 3.4 MeV  $\alpha$ -particles and 0.565 MeV neutrons relative to  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -rays for neoplastic transformation of human hybrid cells and the impact of culture conditions. *Radiat. Prot. Dosim.* **138** (2010), 29–39
- [4] D. Frankenberg, K.-D. Greif, W. Beverung, F. Langner and U. Giesen: The Role of Nonhomologous End Joining and Homologous Recombination in the Clonogenic Bystander Effects of Mammalian Cells after Exposure to Counted 10 MeV Protons and 4.5 MeV  $\alpha$ -Particles of the PTB Microbeam. *Radiat. and Environ. Biophys.* **47** (2008) 431–438
- [5] U. Giesen, F. Langner, C. Mielke, M. Mosconi, W. G. Dirks: Online Imaging of Initial DNA Damages at the PTB Microbeam. *Radiat. Prot. Dosim.* **143** (2011), 349–352.
- [6] M. Mosconi, U. Giesen, F. Langner, C. Mielke, I. Dalla Rosa, W. G. Dirks: 53BP1 and MDC1 foci formation in HT-1080 cells for low- and high-LET microbeam irradiations. *Radiat. and Environ. Biophys.* **50** (2011), 345–352

**Fortsetzung von Seite 54**

Niedrigfeld-Magnetresonanz

Martin Burghoff

**Literatur:**

- [1] M. Burghoff, S. Hartwig, L. Trahms, J. Bernarding: Nuclear magnetic resonance in the nano Tesla range. *Appl. Phys. Lett.*, **87**, (2005), 054103
- [2] S. Hartwig, J. Voigt, H.-J. Scheer, H.-H. Albrecht, M. Burghoff, L. Trahms: Proton magnetic resonance in water revisited. *J. Chem. Phys.* **135**, (2011), 054201
- [3] L. Trahms, and M. Burghoff, *NMR in low fields*: *J. Magn. Reson. Imaging* **28**, (2010), (8), 1244
- [4] I. Hilschensch, R. Körber, H.-J. Scheer, T. Fedele, H.-H. Albrecht, A. Cassará, S. Hartwig, L. Trahms, J. Haase, M. Burghoff: Magnetic resonance imaging at frequencies below 1 kHz. *J MRI* 2012, <http://dx.doi.org/10.1016/j.mri.2012.06.014>
- [5] N. Höfner, H.-H. Albrecht, A. M. Cassará, G. Curio, S. Hartwig, J. Haueisen, I. Hilschensch, R. Körber, S. Martens, H.-J. Scheer, J. Voigt, L. Trahms, M. Burghoff: Are brain currents detectable by means of Low-Field NMR? A phantom study. *J. Magn. Reson. Imaging* **29**, (2011), 1365–1373





# Metrologie für Sicherheit und Gefahrenschutz

Gerhard Ulm\*

Das Forschungsgebiet Sicherheit und Gefahrenschutz gehört zu den wichtigen Themenbereichen, in denen die PTB jetzt und in Zukunft forschend, messend und beratend tätig ist, bzw. sein wird, um den Verbraucherschutz zu fördern und die Lebensbedingungen zu sichern. Dabei sind der PTB durch verschiedene nationale Gesetze und Verordnungen spezielle Aufgaben zugewiesen, beispielsweise durch das Strahlenschutzvorsorgegesetz, die Strahlenschutzverordnung, die Röntgenverordnung, das Beschussgesetz und die Explosionsschutzverordnung.

Die PTB bearbeitet in Absprache und Kooperation mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) die wirtschaftlich und vor allem gesellschaftlich wichtigen Gebiete der physikalischen Sicherheitstechnik und des Explosionsschutzes elektrischer Betriebsmittel [1]. Diese Arbeiten dienen der Verhütung von Schäden durch technische Produkte, Anlagen und Einrichtungen an Personen, Sachen und der Umwelt. Der Explosionsschutz wird dabei im Einzelfall durch technische Lösungen und gesetzliche Bestimmungen realisiert. Die PTB stellt ihre Kompetenz bei der Weiterentwicklung von sicherheitstechnischen Konzepten und von Explosionsschutz ihren Kunden (Bundes- und Länderministerien, Gewerbeaufsicht, Berufsgenossenschaften, Normungsgremien und Wirtschaft) zur Verfügung. Dies gilt auch für die Arbeiten auf dem Gebiet des Strahlenschutzes und der Strahlenschutzvorsorge.

Die Metrologie ionisierender Strahlung ist eine

wesentliche Aufgabe der PTB. Arbeiten, die hier zu nennen sind, betreffen die Messung niedriger Radioaktivitäten, die Messung von Radionukliden in der bodennahen Luft, die Radionuklidanalyse an Umweltproben, Industrieprodukten und -abfällen und die Mitarbeit bei den Leitstellen des Bundes zur Überwachung der Umweltradioaktivität [2].

Es werden mehr und mehr Daten erfasst, sowohl im Bereich des Messens, als auch im Bereich der Kontrolle und Überwachung von Prozessen und Infrastrukturen. Das Sammeln, Zusammenführen und Weiterverarbeiten der Daten unter Berücksichtigung ihrer Unsicherheiten stellt eine wesentliche Aufgabe dar, um aus ihnen die richtigen Schlüsse ziehen zu können.

Kurzbeiträge zur Detektion von Gefahrstoffen in Frachtgut, zum Einsatz von THz-Strahlung im Bereich zivile Sicherheit und zur Sicherheit von Daten zeigen beispielhaft die Forschungstätigkeit der PTB im Bereich der Sicherheit und des Gefahrenschutzes. Daran schließt sich ein umfangreicher Beitrag über den Explosionsschutz an, der innerhalb des Arbeitsbereiches Sicherheit und Gefahrenschutz eine herausragende Rolle spielt. ■

## Literatur

- [1] PTB-Mitteilungen **113** (2003), Heft 2, Themenschwerpunkt Explosionsschutz
- [2] PTB-Mitteilungen **116** (2006), Heft 4, Themenschwerpunkt Ionisierende Strahlung in der Umwelt

\* Dr. Gerhard Ulm,  
Abteilung „Temperatur und Synchrotronstrahlung“  
E-Mail:  
gerhard.ulm@ptb.de

## Detektion von Gefahrstoffen in Frachtgut

**Volker Dangendorf\***

Durch steigende Terrorgefahr<sup>1</sup> und die damit einhergehende Verschärfung der Sicherheitsregeln einiger Länder im internationalen Warenverkehr gewinnt die Untersuchung von Frachtgut auf Gefahrstoffe hin zunehmende Bedeutung. Der enorme weltweite Umsatz von Gütern und die erforderliche Geschwindigkeit beim Warenumschlag machen aber eine gründliche Untersuchung wie z. B. bei der Inspektion von Reisegepäck bei Flugreisenden schwierig und teuer. Innovative Detektionsverfahren, die vollautomatisch gefährliche Stoffe erkennen können, bieten eine Chance, die Sicherheit beim Warenverkehr zu erhöhen und Auflagen zu erfüllen, ohne den Prozess unangemessen zu behindern oder zu verzögern.

Die PTB erforscht federführend gemeinsam mit deutschen und israelischen Partnern ein neues Verfahren für die automatische Detektion von Sprengstoffen und radioaktivem Material für Luftfracht. Im Rahmen des gemeinsam von den deutschen und israelischen Forschungsministerien finanzierten Projektes „Automatisches Cargo-Container-Inspektionssystem (ACCIS)“ werden die Projektpartner aus Forschungsinstituten, Industrie und Endnutzern die wesentlichen Komponenten für ein innovatives Inspektionssystem untersuchen und im Labormaßstab testen.

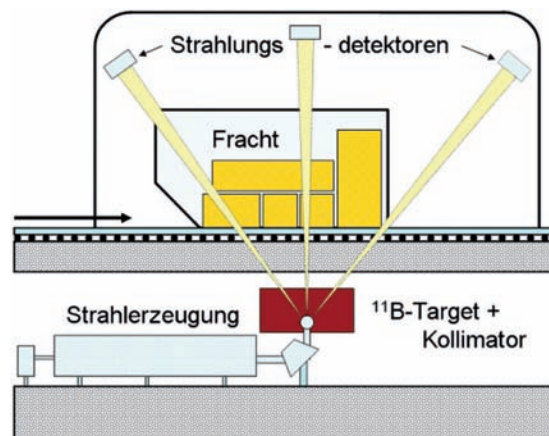
Das neue Verfahren ähnelt in vieler Hinsicht dem herkömmlichen Durchleuchten von Fluggepäck und Cargo mit Röntgenstrahlen. Im ACCIS-Projekt werden allerdings die Eigenschaften von hochauflösender Neutronenresonanz- und Gammadiagnostik und Spektroskopie miteinander kombiniert. Der Mehrwert dieser Verfahrenskombination besteht darin, dass sich eine Vielfalt an Stoffen (z. B. Plastik- und improvisierte Sprengstoffe) aufgrund ihrer Zusammensetzung nachweisen lassen, und die Analyse weitgehend automatisiert werden kann.

Neben den wissenschaftlichen und technologischen Fragestellungen werden im Projekt auch die Bedingungen des Einsatzes dieser Technologie auf Flughäfen oder an Grenzübergängen untersucht, insbesondere die Analyse der rechtlichen Rahmenbedingungen und der öffentlichen Akzeptanz, da aufgrund des Einsatzes ionisierender Strahlung ein hohes Reizniveau insbesondere in der deutschen Bevölkerung antizipiert wird.

Die Partner wollen einen Beitrag dazu leisten, dass zukünftig schnelle und vollautomatische Inspektionssysteme zur Verfügung stehen, die zuverlässig explosive und radioaktive Stoffe in Frachtgut erkennen können. Hierdurch wird nicht nur die Sicherheit von Flugzeugen und anderen Transportmitteln erhöht, sondern es können auch zeitaufwendige manuelle Nachkontrollen vermieden werden. ■

\* Dr. Volker Dangendorf, Arbeitsgruppe „Detektorenentwicklung“  
E-Mail: volker.dangendorf@ptb.de

<sup>1</sup> z. B. Paketbomben in Luftfracht im Nov. 2010 [http://www.spiegel.de/thema/paketbomben\\_jemen\\_2010/archiv-2010309.html](http://www.spiegel.de/thema/paketbomben_jemen_2010/archiv-2010309.html)



Schematische Ansicht eines künftigen Durchleuchtungssystems für Luftfracht

## Terahertz-Strahlung sicher messen

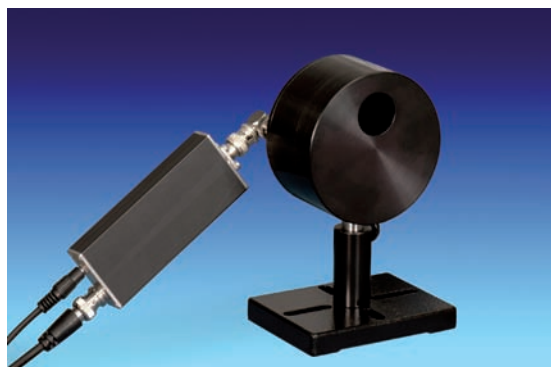
**Andreas Steiger\***

Terahertz-Strahlung, d. h. elektromagnetische Strahlung mit Frequenzen um 1 THz bzw. Wellenlängen um 1 mm, liegt im Grenzgebiet zwischen Optik und Elektronik. Einerseits ist dies die höchste Hochfrequenz, die elektronisch erzeugt werden kann, andererseits die Ferninfrarotgrenze optischer Strahlung mit besonderen Eigenschaften. Aufgrund der geringen Photonenenergie ist die Strahlung nicht ionisierend, und in diesem Spektralgebiet ändern viele Stoffe ihre Transmission, Reflektion und Absorption. Das ermöglicht neuartige Technologien zur Sicherheitsüberprüfung von Passagieren und Fracht auf Flughäfen und Bahnhöfen. Beispiele aktueller Entwicklungen für eine zukünftig verbesserte „homeland security“ sind aktiv bildgebende THz-Systeme wie Körperscanner und THz-Spektrometer zur Detektion von verbotenen gefährlichen Substanzen. Solche Systeme, die eine THz-Laserstrahlungsquelle zur

Beleuchtung von Untersuchungsobjekten benutzen, erfordern eine genaue Leistungsmessung, um Grenzwerte für elektromagnetische Strahlung einhalten zu können. Allerdings existiert bisher keine zuverlässige THz-Metrologie. Nur die PTB bietet als weltweit einziges Metrologie-Institut bereits die auf das Internationale Einheitensystem (SI) rückgeführte Kalibrierung der Leistungsempfindlichkeit von THz-Detektoren bei 2,52 THz an.

Als Reaktion auf die Wünsche der Kunden für diese Dienstleistung entwickelte die PTB in Zusammenarbeit mit einem deutschen Hersteller von Energie- und Leistungssensoren für Laserstrahlung einen einfach zu kalibrierenden Terahertz-Detektor. Er deckt den weiten Spektralbereich von ferninfraroter Laserstrahlung bis hinab zu 1 THz ab. So leistete das Kooperationsprojekt einen bedeutenden Beitrag zur Schließung der metrologischen Lücke im Terahertz-Spektralgebiet. ■

\* Dr. Andreas Steiger, Arbeitsgruppe „Terahertzradiometrie“  
E-Mail: andreas.steiger@ptb.de



Erstes Funktionsmuster eines einfach zu kalibrierenden Terahertz-Detektors mit angepasstem Signalverstärker.



Blick ins Innere des neuartigen Terahertz-Detektors: ein durch PTB-Patent geschützter kompakter Aufbau als Strahlungsfalle mit drei Sensorelementen erfasst die im Terahertz-Spektralgebiet typischen, großen Reflektionsverluste eines einzelnen Sensorelements.



# Vertrauenswürdige Messdaten nur mit IT-Sicherheit

Dieter Richter\*

Vertrauenswürdige Messdaten entstehen durch richtiges und genaues Messen. Die Richtigkeit und Genauigkeit von Messungen ist von zentraler Bedeutung für die Metrologie. Messen schließt aber fast immer auch Informationsverarbeitung und immer häufiger Informationsübertragung ein. Wie wird nun gesichert, dass die Informations- und Kommunikationsprozesse zuverlässig sind? Und wie wird gesichert, dass elektronisch erstellte Rechnungen im geschäftlichen Verkehr die richtigen, d. h. die authentischen und unverfälschten Messwerte enthalten? Die Beantwortung dieser Fragen gehört zum Aufgabenbereich des gesetzlichen Messwesens.

Die Rechnungsprüfung gestaltet sich übersichtlich, wenn der Verbraucher seine Messwerte und geltenden Tarife einfach nachverfolgen kann. Das ist z. B. beim klassischen Energieverbrauchszähler in der Wohnung, beim Tanken an der Zapfsäule oder beim Wägen in der Verkaufsstelle der Fall. Was aber, wenn intelligente Zähler es gestatten, Tarife häufiger zu wechseln, oder wenn man zukünftig mit dem Elektrofahrzeug bei unterschiedlichen Energieanbietern mit unterschiedlichen Tarifen Strom laden kann (Bild 1)?

Mit solchen Fragen beschäftigt sich der Fachbereich Metrologische Informationstechnik der PTB. Der Fachbereich hat immer wieder zu bewerten, ob neuere IT-Lösungen und insbesondere die vorgesehenen Maßnahmen zur IT-Sicherheit den Anforderungen des gesetzlichen Messwesens entsprechen. Gemeinsam mit Partnern aus der Industrie sowie Fachleuten der Messtechnik und der IT-Sicherheit aus anderen Instituten werden aber auch neue Konzepte entwickelt. Dabei bildet die Kompatibilität neuester IT-Sicherungsverfahren mit den Prinzipien der Metrologie einen Schwerpunkt der Forschung und Entwicklung. Ein anderer Schwerpunkt besteht in der Rückführung von Sicherheitsanforderungen, die sich aus der Metrologie bzw. dem gesetzlichen Messwesen begründen, auf IT-Sicherheitsstandards, um die Potenziale der gesamten IT-Sicherheitstechnologie optimal zur Anwendung bringen zu können (Bild 2). Ein dritter Schwerpunkt ist die Qualitätsbewertung metrologischer Software. Fehlerhafte Software beeinträchtigt nicht nur die Leistungsmerkmale von technischen Systemen, sondern ist auch aus Sicherheitsgründen ein Risikofaktor. ■

\* Prof. Dr. Dieter Richter, Fachbereich „Metrologische Informationstechnik“ E-Mail: dieter.richter@ptb.de



Bild 1: Station zum Laden von Elektrofahrzeugen

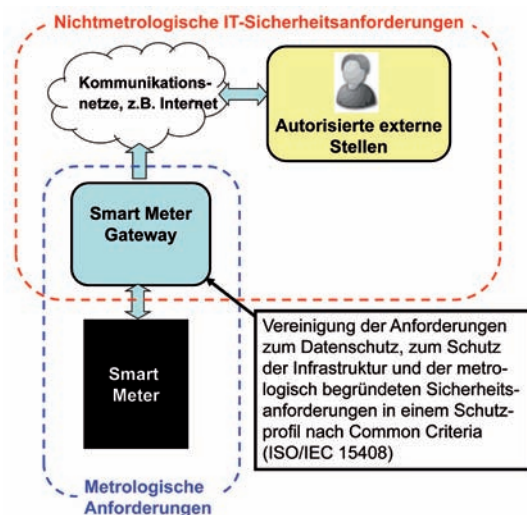


Bild 2: Smart Meter: Symbolische Darstellung der Rückführung metrologischer Anforderungen auf IT-Sicherheitsstandards

# Explosionsschutz in der PTB

Michael Beyer\*, Heino Bothe\*\*

## 1 Einführung

Da der Explosionsschutz in der PTB innerhalb des Themengebietes Sicherheit und Gefahrenschutz eine herausragende Rolle spielt, ist ihm in diesem Heft eine ausführliche Darstellung gewidmet.

Im täglichen Leben, in Industrie, Handwerk und Gewerbe werden häufig brennbare Stoffe genutzt, wie beispielsweise Kraftstoffe, die wir zum Autofahren benötigen, brennbare Lösemittel und Lacke im Malerhandwerk, brennbare Flüssigkeiten und Gase in der chemischen und petrochemischen Industrie oder brennbare Stäube (wie Mehl) in der Nahrungsmittelindustrie. Fein verteilt in Luft (oder anderen Oxidationsmitteln) können sie ein explosionsfähiges Gemisch bilden, dessen Entzündung schwerwiegende oder katastrophale Folgen haben kann, wie Unglücksfälle immer wieder zeigen. Großereignisse, wie die Explosion und der Großbrand des Tanklagers in Buncefield (UK, s. Bild 1) im Dezember 2005, die Explosion der Raffinerie in Texas City (2005) oder der Bohrinself Deepwater Horizon (2010), der Brand an einer Ethylenfernleitung in Köln-Worringen (2008), aber auch verheerende Mehlstaubexplosionen in Mühlen sowie schwere Unfälle in Kohlegruben machen diese Gefahr immer wieder deutlich und zeigen, wie wichtig es ist, durch technische und organisatorische Schutzmaßnahmen Explosionen zu verhindern.

Daher wurden im deutschen Kohlebergbau früh gesetzliche Regelungen getroffen, denn ungeschützte Betriebsmittel entzündeten allzu oft „schlagende Wetter“ unter Tage. Schon in den Jahren 1884/1885 ließ die Preußische Schlagwet-



Bild 1:  
Schaden nach dem Großbrand des Tanklagers  
Buncefield nördlich von London 2005.  
© Chris Radburn/Pool/PA/Reuters/Corbis

terkommission die unter Tage eingesetzten Geräte bewerten, und in den Folgejahren wurden – wie auch in Großbritannien – geeignete Zündschutzmaßnahmen und Prüfverfahren entwickelt.

Gleichzeit erkannte man auch den Umgang mit brennbaren Flüssigkeiten als Gefahrenquelle und begegnete ihr im Jahr 1882 mit dem Erlass der „Verordnung über das gewerbsmäßige Verkaufen und Feilhalten von Petroleum“. Für den Bereich der Übertage-Industrie übernahm 1920 die Chemisch-Technische Reichsanstalt (CTR) in Berlin Prüfungen von explosionsgeschützten und flammendurchschlagsicheren Einrichtungen. Nach dem zweiten Weltkrieg ging diese Aufgabe auf die neu gegründete PTA als Vorläuferin der PTB über. Später wurden die Aufgaben nach fachlichen Schwerpunkten auf die BAM (als Nachfolgeorganisation der CTR) und die PTB neu verteilt. Sie werden heute im gemeinsamen Aufgabenbereich Physikalisch-Chemische Sicherheitstechnik in enger Abstimmung bearbeitet.

Der Explosionsschutz als Teil dieses gemeinsamen Arbeitsgebietes umfasst die Eigenschaften der explosionsfähigen Atmosphäre, die Zündquellenbeherrschung und Begrenzung der Explosionsauswirkungen, sowie Beschaffenheitsanforderungen an explosionsgeschützte Geräte, Schutzsysteme und Anlagen bis hin zu den Betriebsvorschriften der Anlagensicherheit und zum Transport gefährlicher Güter. Diese Explosionsschutzthemen werden in der PTB mit dem Schwerpunkt der Vermeidung von elektrischen und mechanischen Zündquellen sowie Fragen zum Umgang mit brennbaren Flüssigkeiten bearbeitet, während die BAM hier für den Umgang mit brennbaren Gasen und Stäuben zuständig ist. Zum Aufgabengebiet der BAM gehört zusätzlich auch die Sicherheit beim Umgang mit gefährlichen reaktionsfähigen Stoffen, wie z. B. Gasen, Feststoffen, Explosivstoffen und Gegenständen (z. B. Pyrotechnik) sowie Umschließungen und Technik für Transport und Lagerung gefährlicher Stoffe und Güter.

Diese Aufgabenteilung besteht seit Jahrzehnten und hat sich gut bewährt. Seit 2005 gibt es ein gemeinsames Lenkungsgremium für den Bereich der Physikalisch-Chemischen Sicherheitstechnik, das die Arbeiten in diesem Gebiet koordiniert.

Die sicherheitstechnische Beurteilung von Explosionsgefährdungen wird klassisch in einem Drei-Stufen-Prozess durchgeführt, wobei zunächst die Vermeidung explosionsfähiger Atmosphä-

\* Dr. Michael Beyer,  
Fachbereich „Zündquellen-sicherheit“  
E-Mail:  
michael.beyer@  
ptb.de

\*\* Dr. Heino Bothe,  
Fachbereich „Grundlagen des Explosions-schutzes“  
E-Mail:  
heino.bothe@ptb.de

ren oder Gemische angestrebt wird. Gelingt dies sicher z. B. durch Verwendung nichtbrennbarer Ersatzstoffe oder Prozessführung außerhalb der Explosionsgrenzen, sind keine weiteren Explosionsschutzmaßnahmen nötig. Andernfalls steht die Beherrschung von Zündquellen im Vordergrund. Wenn aber Prozesse nicht zündquellenfrei betrieben werden können, müssen in der letzten Stufe die Auswirkungen von Explosionen auf ein unbedenkliches Maß begrenzt werden. Alle Stufen dieses Prozesses sind im Aufgabenspektrum der vier PTB-Fachbereiche des Explosionsschutzes (Grundlagen des Explosionsschutzes, Zünddurchschlagprozesse, System- und Eigensicherheit, Zündquellsicherheit) enthalten.

## 2 Prüfen, Zertifizieren und Überwachen – vom nationalen Monopolisten zum Global Player

Die europäische Harmonisierung erreichte den Explosionsschutz schon eher als andere gesetzlich geregelte Bereiche. Zunächst wurde 1976 durch eine europäische Rahmen-Richtlinie (Richtlinie 76/117/EWG) dieser bis dahin national gesetzlich geregelte Bereich für elektrische Geräte auf europäische Grundlagen gestellt, wobei in sogenannten Einzelrichtlinien (79/196/EWG und folgende) explizit die zugehörigen europäischen Normen für die Konformität festgelegt wurden. Besonders sensible Bereiche blieben zunächst ausgenommen und unterlagen einer staatlichen Bauartzulassungspflicht mit der PTB als Prüfstelle.

Mit der „New Approach“-Richtlinie 94/9/EG („ATEX“) wurde dann die vollständige Harmonisierung der Anforderungen für das Inverkehrbringen von autonomen Schutzsystemen und explosionsgeschützten elektrischen und nichtelektrischen Geräten in Europa erreicht. Diese Richtlinie enthält Konformitätsbewertungsverfahren, die häufig die Mitwirkung einer „benannten Stelle“ erfordern, sowohl bei der Prüfung der Produkte wie auch bei der Fertigungsüberwachung der Hersteller. Mit dieser Richtlinie wurde die gesetzliche Monopolstellung der PTB in Deutschland für die Bereiche der Zone 0 und der Verordnung über brennbare Flüssigkeiten (VbF) aufgehoben und eine große Anzahl von „benannten Stellen“ etablierte sich in der Folge in Europa, wobei die PTB zu den ersten Stellen dieser Art gehörte. Zum Umfang der Benennung der PTB gehören die Bewertung von explosionsgeschützten Geräten und autonomen Schutzsystemen (in Form von Flammendurchschlagsicherungen) sowie die richtlinienspezifische Anerkennung der Qualitätsmanagementsysteme von Herstellern. Zu den Prüfaufgaben der PTB gehört auch die Bestimmung der sicherheitstechnischen Kenngrößen von brennbaren Flüssigkeiten als Grundlage

für Explosionsschutzmaßnahmen und für den Gefahrguttransport.

Für den globalen Markt benötigen die deutschen Hersteller weltweit anerkannte Zertifikate. Diese bietet das internationale IECEx-System, bei dessen Gründung und Entwicklung die PTB ein wesentlicher Motor war. Daneben ist insbesondere für den nordamerikanischen Markt eine Partnerschaft mit der amerikanischen Prüforganisation Underwriters Laboratories Inc. (UL) sehr hilfreich, die zusätzlich zur Prüfung nach europäischen Anforderungen auch Bewertungen nach US-Anforderungen bietet. Weitere internationale Kooperationen sichern die Akzeptanz der PTB-Zertifikate in wichtigen Industrieregionen, aber auch national gibt es u. a. eine enge Zusammenarbeit mit dem VDE-Prüf- und Zertifizierungsinstitut.

Weltweit anerkannte Konformitätsbewertung erfordert gleiche Qualifikation und gleiche Bewertungsmaßstäbe der prüfenden Stellen. Deshalb wurde erstmalig unter Leitung der PTB ein weltweites Programm von Vergleichsmessungen bei typischen Prüfverfahren für explosionsgeschützte Geräte begonnen, dem sich inzwischen die wichtigsten Prüfstellen des IECEx-Systems angeschlossen haben.

## 3 Wissenstransfer in Wirtschaft und Gesellschaft

Die PTB gehört zu den wenigen Prüfstellen, die eigene Forschungen und Untersuchungen in allen Bereichen des Drei-Stufen-Prozesses des Explosionsschutzes durchführen. Sie betreibt Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu den Eigenschaften explosionsfähiger Atmosphäre, zu elektrischen und nichtelektrischen Zündquellen sowie zum Ablauf von Explosions- und Detonationsvorgängen, einerseits als Grundlagenforschung zu Entzündungsprozessen, andererseits als pränormative Forschung für die Normungs- oder Regelwerksarbeiten oder als Basis für technische Entwicklungen. Mit diesem Wissen bietet die PTB gerade auch in innovativen Bereichen Prüf- und Beratungsleistungen für Hersteller explosionsgeschützter Geräte und Schutzsysteme sowie für die Betreiber explosionsgefährdeter Anlagen an.

### 3.1 Sicherheitstechnische Kenngrößen – Basis für die Beurteilung von Explosionsgefahren

Die Grundlage für die Beurteilung von Explosionsgefahren sind die sicherheitstechnischen Kenngrößen brennbarer Stoffe. Diese Kenngrößen werden in der PTB für brennbare Flüssigkeiten bestimmt und werden für die Beurteilung benötigt, ob explosionsfähige Atmosphäre vorliegt (z. B. an Hand der Kenngrößen Explosionsgrenzen, Sauerstoffgrenzkonzentration, Explosionspunkt oder Flammpunkt), ob die brennbaren Stoffe entzündet





Bild 2:  
Entzündung eines Kohlenwasserstoff/Luft-Gemisches in Anlehnung an die Zündtemperaturbestimmung nach DIN EN 14522

werden können (z. B. mit Hilfe der Zündtemperatur (Bild 2) oder der Mindestzündenergie), aber auch für eine Aussage zu den Auswirkungen einer Explosion (z. B. mit Hilfe des maximalen Explosionsdrucks und der maximalen Explosionsdruckanstiegsgeschwindigkeit). Der Einfluss besonderer Bedingungen auf die Verbrennungsreaktion (wie hohe oder niedrige Drücke und Temperaturen oder spezielle Oxidationsmittel) wird erforscht, um zu aktuellen Entwicklungen in der Verfahrenstechnik sicherheitstechnische Aussagen machen zu können. Die Kenngrößen werden in der gemeinsam von BAM, PTB und DECHEMA betriebenen Datenbank CHEMSAFE erfasst, deren wesentliches Merkmal der Bewertungsprozess vor der Aufnahme der Stoffdaten in die Datenbank ist, wodurch eine besondere Verlässlichkeit der Informationen erreicht wird.

### 3.2 Vermeiden explosionsfähiger Atmosphäre

Wenn es darum geht, explosionsfähige Atmosphäre zu vermeiden, liefert die PTB zur Beurteilung dieser Maßnahme einerseits die notwendigen sicherheitstechnischen Kenngrößen, führt andererseits aber auch experimentelle und rechnerische Untersuchungen exemplarischer betrieblicher Situationen durch (Bild 3), die dann verallgemeinert die Basis für Zonenfestlegungen in den Explosionsschutzdokumenten von Anlagenbetreibern oder auch für Regelungen von Staat oder Berufsgenossenschaften bilden können.

### 3.3 Vermeidung von Zündquellen

In explosionsgefährdeten Bereichen sind unterschiedlichste Zündquellen zu beachten (z. B. heiße Oberflächen, elektrostatische Entladungen, elektrische und mechanische Funken, optische Strahlung oder Ultraschall). Die PTB kümmert sich um diese Zündquellen in Forschung, Prüfung und praktischer Beurteilung.

Die typische Strategie, Zündquellen an explosionsgeschützten Geräten zu vermeiden, ist die Anwendung von genormten „Zündschutzarten“. Wenn diese auch für elektrische und nicht-elekt-

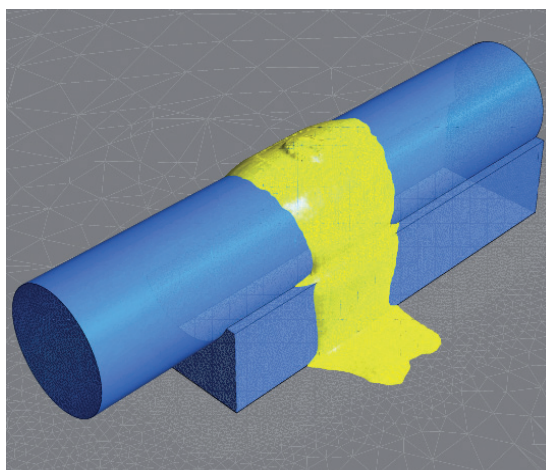


Bild 3:  
Untersuchungen zur Ausbreitung explosionsfähiger Atmosphäre beim Befüllen von Tankwagen über den offenen Dom sowie die zugehörige CFX-Simulation der ausfließenden Dämpfe aus der Domöffnung

rische Geräte unterschiedlich ausgeprägt sind, so folgen sie doch dem gleichen Muster. Man kann die gespeicherte (elektrische) Energie so begrenzen, dass sie zu klein ist, das explosionsfähige Gemisch zu entzünden („Eigensicherheit“), (Bild 4), oder die Zündquelle wird durch gute Konstruktion vermieden („erhöhte Sicherheit“ oder „konstruktive Sicherheit“). Wenn auf diese Weise kein Erfolg möglich ist, kann man durch Kapselungstechniken den Zutritt der Ex-Atmosphäre zur Zündquelle verhindern (wie bei der „Überdruckkapselung“;



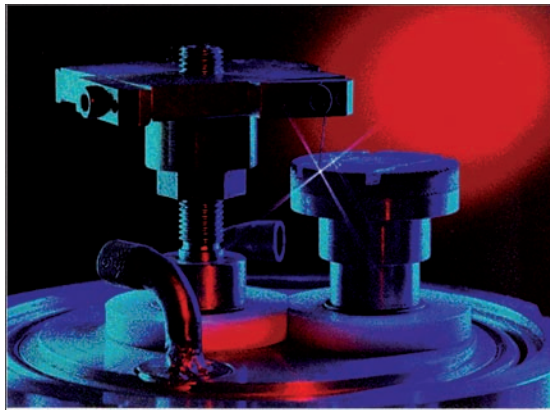


Bild 4: Funkenprüfgerät zur Prüfung von eigensicheren Stromkreisen

„Öl- oder Flüssigkeitskapselung“, „Vergusskapselung“ oder der „schwadensicheren Kapselung“), den Entzündungsvorgang im Keim ersticken („Sandkapselung“) oder eine mögliche Explosion sicher einschließen („druckfeste Kapselung“).

Elektrische Zündquellen sind dabei allein auf Grund der Menge und Vielfalt der elektrischen Geräte die häufigste Zündquellenart. Hier leistet die PTB wichtige Forschungsbeiträge zu den Grundlagen der genannten Zündschutzarten, insbesondere für die Eigensicherheit (Bild 4), erhöhte Sicherheit und die druckfeste Kapselung. Dabei stehen die Anpassung der Explosionsschutzkonzepte an neue Entwicklungen z. B. in der Mess- und Regeltechnik, bei neuen Lichtquellen oder der Antriebstechnik im Vordergrund.

In mechanischen Geräten und Bauteilen wie Getrieben, Pumpen, Rührwerken oder dynamischen Dichtungen können bei technischen Defekten oder auch im normalen Betrieb durch Schlagvorgänge oder durch kontinuierliche Reibung wirksame Zündquellen entstehen. Dies sind einerseits abgetrennte Partikel hoher Temperatur (mechanische Funken) und andererseits bei Reibvorgängen auch heiße Oberflächen. Hier arbeiten PTB und BAM in der Forschung und der Prüfung von mechanischen explosionsgeschützten Geräten eng zusammen.

Zum Aufgabengebiet der PTB gehören auch spezielle Zündquellen, wie elektrostatische Entladungen, optische Strahlung oder Ultraschall.

An der Entwicklung neuer technischer Lösungen zur Vermeidung von Zündquellen sind PTB-Mitarbeiter wesentlich beteiligt, wie z. B. die Entwicklungen für ein eigensicheres Energieversorgungskonzept mit hoher elektrischer Leistung (Power-i/DART), Brennstoffzellen in explosionsgefährdeten Bereichen, Umrichterspeisung von explosionsgeschützten Motoren oder neuartige Sinterwerkstoffe für Flammensperren und Druckentlastungseinrichtungen an druckfesten Kapselungen zeigen.

### 3.4 Begrenzung der Auswirkungen einer Explosion

Wenn sich Zündquellen nicht ausreichend sicher vermeiden lassen, müssen Explosionen auf andere Weise beherrscht werden. Beispielsweise lassen sich die Auswirkungen von Explosionen auf ein unbedenkliches Maß begrenzen, wenn die Explosion sicher eingeschlossen (explosionsdruckfeste Bauweise, druckfeste Kapselung) oder gestoppt wird (durch Flammensperren oder Explosionsunterdrückung) oder aber die Druckwirkung abgeschwächt wird (durch Explosionsdruckentlastung).

Ein PTB-Arbeitsschwerpunkt ist hier die Vermeidung von Flammendurchschlägen, wie es z. B. Flammensperren gewährleisten, wie es aber auch bei der druckfesten Kapselung zusätzlich zur Explosionsfestigkeit des Gehäuses gefordert wird. Die PTB führt neben Grundlagenuntersuchungen auf diesem Gebiet auch weitere Forschungsarbeiten durch, wie zur Verwendung neuer Werkstoffe für flammendurchschlagsichere Elemente (Bild 5) und Druckentlastungseinrichtungen an druckfesten Kapselungen oder zur Nutzung der sehr kleinen inneren Strukturen von mikroverfahrenstechnischen Apparaturen als flammendurchschlagsichere Bauteile.

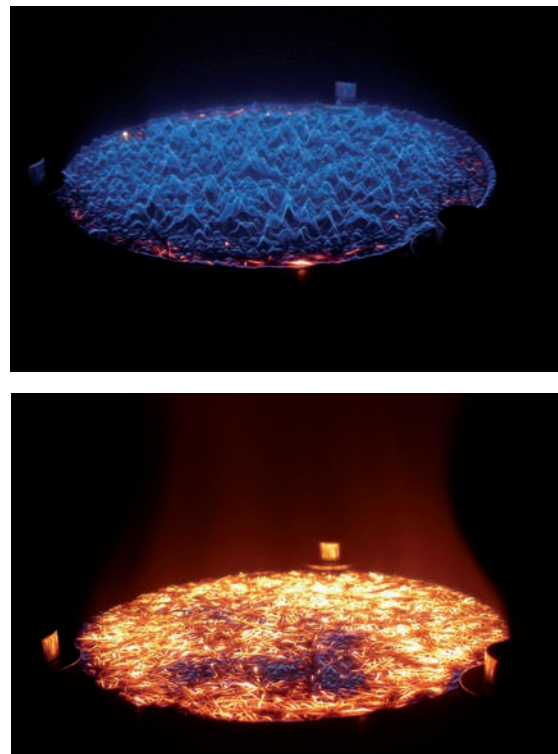


Bild 5: Untersuchungen an einer Flammendurchschlagsicherung neuartiger Konzeption auf Dauerbrandsicherheit bei verschiedenen Durchströmungsgeschwindigkeiten des explosionsfähigen Gemisches (oben: 400 l/min , unten: 170 l/min)

### 3.5 Politikberatung, Normung und Unterstützung der Industrie

Das Wissen und die Erfahrung aus Forschung, Entwicklung und Prüfung sind die Basis für die Beratung der vom Explosionsschutz betroffenen Kreise durch die Mitarbeiter der PTB. Als Ressortforschungseinrichtung der Bundesregierung ist dies eine wichtige Aufgabe der PTB (gemeinsam mit der BAM), damit sie ihrer Scharnierfunktion zwischen der Wirtschaft und der Gesellschaft gerecht werden kann. Dazu gehört die Beratung der Bundesregierung in den sicherheitstechnischen Gremien verschiedener Bundesministerien für den Gefahrguttransport (BMVBS), für die Arbeitssicherheit (BMA) sowie für die Anlagensicherheit (BMU). Vertreter der PTB arbeiten in Gremien der Berufsgenossenschaften mit und beraten darüber hinaus die Gewerbe- und Marktaufsicht der Bundesländer sowie andere Behörden, aber auch die Industrie wie die Hersteller explosionsgeschützter Geräte und Betreiber überwachungsbedürftiger Anlagen.

Die europäische und internationale Normung spielt für diese Industrien eine immer größere Rolle, denn die deutschen Unternehmen sind abhängig vom weltweiten Handel mit Geräten, Chemieprodukten und Ingenieurdienstleistungen. Dabei sind harmonisierte europäische Normen, die die Vermutungswirkung bezüglich der Sicherheitsanforderungen der europäischen Richtlinie

94/9/EG (ATEX) auslösen, für den Explosionsschutz besonders wichtig. Für den elektrischen Explosionsschutz werden solche Normen inzwischen nahezu ausschließlich auf internationaler Ebene erarbeitet (im IEC/TC 31 "Equipment for explosive atmospheres") und dann als harmonisierte europäische Normen übernommen. Bei den Normen des CEN/TC 305 für nichtelektrische Geräte, Schutzsysteme und sicherheitstechnische Kenngrößen, die bisher ausschließlich auf europäischer Ebene entwickelt wurden, vollzieht sich dieser internationale Prozess gerade im IEC/SC 31M „Non-electrical equipment and protective systems for explosive atmospheres“.

Mitarbeiter der vier PTB-Fachbereiche des Explosionsschutzes arbeiten auf allen Ebenen dieses Normungsprozesses in fachlichen und leitenden Funktionen mit. Sie vertreten dabei sicherheitstechnische und technologische Grundsätze, wie sie in Deutschland und Europa über Jahrzehnte entwickelt wurden und unterstützen damit auch die vielen KMU, die sich selber nicht an der internationalen Normung beteiligen können.

Der erfolgreiche Technologietransfer, den die PTB in den letzten Jahren im Explosionsschutz geleistet hat, wurde mit hohen Auszeichnungen in den Bereichen Forschung, technische Entwicklung und Normung gewürdigt. (Dieser Text basiert in Teilen auf dem Beitrag „Physikalisch-chemische Sicherheitstechnik und Explosionsschutz in PTB und BAM“ in den PTB-Mitteilungen 1/2011) ■

# Zünddurchschlagsicherheit in der Mikroverfahrenstechnik

**Elisabeth Brandes\***

Die chemische Industrie verwendet in zunehmendem Maße die Mikroverfahrenstechnik. Dadurch lassen sich Reaktionen, für die Substanzen mit hohem Oxidationspotential (Sauerstoff, Distickstoffmonoxid, etc.) eingesetzt werden, besser beherrschen.

Mikroverfahrenstechnische Apparaturen sind jedoch trotz ihrer geringen inneren Abmessungen nicht inhärent sicher, wenn die gewünschten Reaktionen bei erhöhten Temperaturen und Drücken ablaufen und reaktivere Oxidationsmittel eingesetzt werden (nach Untersuchungen der BAM). Um die Ausbreitung einer Flammenfront in derartigen Apparaturen zu verhindern, müssen die charakteristischen Eigenschaften des Flammendurchschlags bekannt sein.

Zur Untersuchung der Durchschlagvorgänge in mikrostrukturierten Bauteilen wurden zwei Ansätze gewählt. Detonative Flammendurchschläge durch Einzelkapillaren (Edelstahl oder Glas) mit typischen Durchmessern wurden messtechnisch oder direkt beobachtet (Bild 1). Alternativ wurden Charakteristika wie Detonationsgeschwindigkeit, Detonationsdruck und

Detonationszellbreite in Rohren mit größeren Durchmessern (10 mm) ermittelt, um daraus auf das Verhalten in Kapillaren zu schließen. Die Apparaturen eignen sich für Temperaturen bis 150°C, Ausgangsdrücke bis 20 bar und für Oxidationsmittel mit hohem Oxidationspotential.

Die Untersuchungen an unterschiedlichen Kohlenwasserstoff/Sauerstoff-Gemischen bestätigten, dass Kapillarrohre mit sehr geringem Rohrdurchmesser, wie sie in der Mikroreaktionstechnik eingesetzt werden, keinesfalls inhärent sicher gegen den Durchschlag einer Detonation sind. Die Ausbreitungsgeschwindigkeiten (Bild 2) in diesen Kapillaren werden zwar deutlich verringert, liegen aber eindeutig im detonativen Bereich.

Die „ $\lambda/3$ -Regel“, nach der der Rohr-/Kapillardurchmesser für einen erfolgreichen Zünddurchschlag mindestens  $1/3$  der Detonationszellbreite betragen muss, wurde bestätigt. Somit kann die Gefahr eines Zünddurchschlages durch mikrostrukturierte Bauteile entweder durch die Ermittlung der Breite der Detonationszellen unter Anwendung der  $\lambda/3$ -Regel oder durch direkte Beobachtung des Durchschlagvorganges beurteilt werden. ■

\* Dr. Elisabeth Brandes, Arbeitsgruppe „Kenngrößen des Explosionsschutzes“ E-Mail: elisabeth.brandes@ptb.de

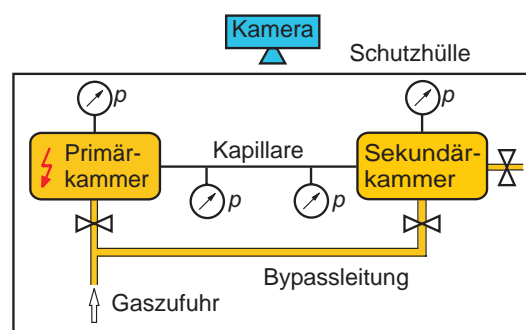


Bild 1: Skizze der Versuchsanordnung zur optischen Erfassung von Detonationen

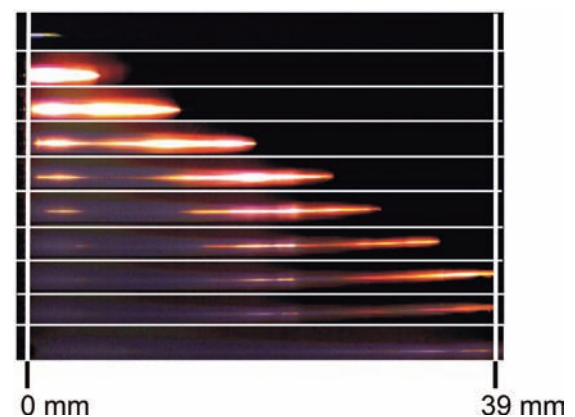


Bild 2: Durchschlag einer Ethan/O<sub>2</sub>-Detonation bei 1 bar durch eine Glaskapillare mit Durchmesser 0,5 mm. (10 versetzte Einzelbilder ( $\Delta t$ : 37  $\mu$ s))

# Zündgefahrenbewertung von PEM-Brennstoffzellen hinsichtlich innerer explosionsartiger Verbrennungsreaktionen

Thomas Horn\*

Die Entwicklung eines Explosionsschutzkonzeptes für eine Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (PEM-BZ) erfordert eine umfassende Analyse hinsichtlich möglicher Zündgefahren.

Während des Brennstoffzellenbetriebes sind die Prozessgase – Wasserstoff (H<sub>2</sub>) und Sauerstoff der Luft – voneinander separiert. Die Alterung der eingesetzten Materialien kann jedoch zu inneren Leckagen führen. Bei Auftreten einer wirksamen Zündquelle sind innere explosionsartige Verbrennungsreaktionen denkbar (vgl. Bild 1).

Die Auswirkungen einer inneren Explosion stellen wiederum eine wirksame Zündquelle für eine die Brennstoffzelle umgebende explosionsfähige Atmosphäre dar. Daher wurde die Zünd-

willigkeit eines H<sub>2</sub>/Luft-Gemisches innerhalb der Brennstoffzelle experimentell untersucht. In Brennstoffzellen-Versuchsanordnungen (vgl. Bild 2) wurde ein Brenngasübertritt simuliert. Bei den Zündversuchen konnten explosionsartige Verbrennungsreaktionen während des Brennstoffzellenbetriebes nur bei gaseingangsnaher Fremdzündung detektiert werden. Die Ursache ist der mit zunehmender Weglänge steigende Feuchte- und Stickstoffanteil des H<sub>2</sub>/Luft-Gemisches, welches an der Katalysatorschicht direkt exotherm umgesetzt wird. In Richtung Gasausgang führte dies demzufolge zu einer zunehmenden Inertisierung des Gemisches [1]. ■

\* Dr.-Ing. Thomas Horn, Arbeitsgruppe „Eigensicherheit“ E-Mail: thomas.horn@ptb.de

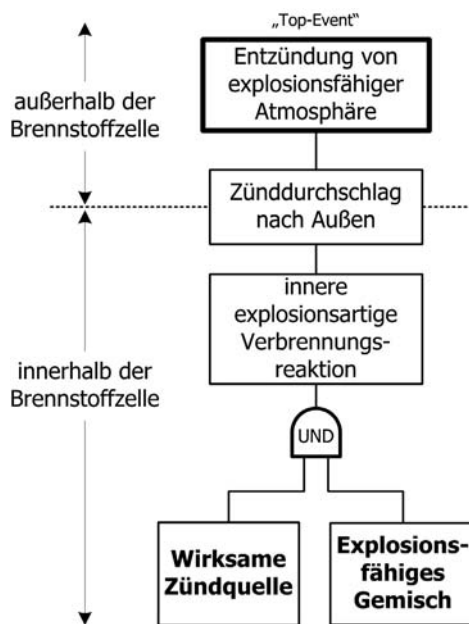


Bild 1: Vereinfachte Fehlerbaumstruktur zum unerwünschten Ereignis



Bild 2: Brennstoffzellen-Versuchsanordnung



# Zündung durch elektrische Entladungen

**Detlev Markus\***

Elektrische Energie ist in vielen Bereichen des täglichen Lebens essentiell. Neben dem enormen Nutzen elektrischer Energie müssen jedoch auch ihre Gefahren beachtet werden, so auch beim Einsatz in explosionsfähiger Atmosphäre. Es existieren verschiedene Konzepte zur Beurteilung der Wahrscheinlichkeit einer Zündung explosionsfähiger Atmosphären durch elektrische Zündquellen. Will man Modellierungen dafür verwenden, ist zu beachten, dass eine Entzündung durch eine solch große Anzahl von sich gegenseitig beeinflussenden chemischen und physikalischen Einzelprozesse bestimmt wird, dass eine Bewertung von Zündgefahren alleine durch rechnerische Modelle heute noch nicht möglich ist. Neue elektrische Energiespeisekonzepte wie Power-i/DART oder die Verwendung von umrichter gespeisten Antrieben in explosionsgefährdeten Bereichen erfordern jedoch detaillierte Kenntnisse der jeweiligen Zündvorgänge. Forscher der PTB untersuchen daher mit numerischer Simulation und modernen laseroptischen Verfahren den Übergang von der Einkopplung elektrischer Energie durch elektrische Gasentladungen zur sich selbsterhaltenden Flammenausbreitung einer Explosion. Dabei steht die PTB durch gemeinsame Forschungsprojekte im engen Kontakt zu verschiedenen Institutionen im In- und Ausland.

Ziel der Forschungsarbeiten ist es, langfristig eine Beurteilung der Zündwahrscheinlichkeit für unterschiedliche Arten der elektrischen Entladung zu ermöglichen. Das Forschungsgebiet umfasst daher verschiedene elektrische Entladungsformen. Teilentladungen beispielsweise wurden lange als unbedeutend für mögliche Zündvorgänge betrachtet. Da hier die Gasentladung erlischt, bevor eine Thermalisierung zwischen den Gasmolekülen und Elektronen in der Entladungsstrecke abgeschlossen ist, wird die elektrische Energie bei dieser Entladungsform zu einem großen Teil in Form von kinetischer Energie von Elektronen umgesetzt. Neben der Erwärmung des Gasvolumens ist somit auch die Erzeugung von verschiedenen reaktiven Spezies durch Dissoziation von Gasmolekülen in Folge von Stößen mit hochenergetischen Elektronen von Bedeutung. Bei Verwendung von hochfrequenter Wechselspannung kann es nun zu einer Akkumulation dieser sehr effektiven Energieeinkopplung über viele Schwingungszyklen kommen, wodurch schließlich doch eine explosionsfähige Atmosphäre gezündet werden kann. Auch Teilentladungen in Folge von hochfrequenten Ausgleichsvorgängen in elektrischen Versorgungsnetzen müssen daher bei der sicherheitstechnischen Beurteilung von explosionsgefährdeten Bereichen berücksichtigt werden. ■

\* Dr.-Ing. Detlev Markus, Arbeitsgruppe „Modellierung von Flammendurchritten“ E-Mail: detlev.markus@ptb.de

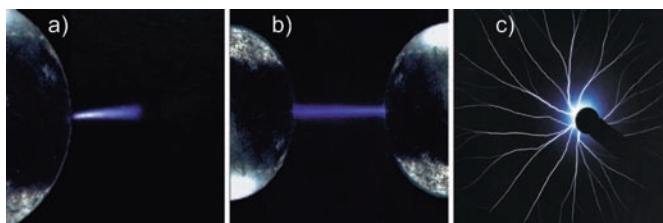


Bild 1:  
Elektrische Entladungsformen:  
a) Büschelentladung,  
b) Funkenentladung,  
c) Gleitstielbüschelentladung

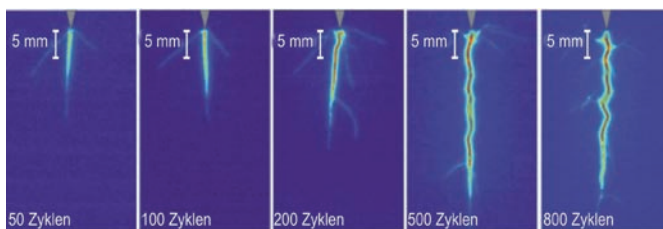


Bild 2:  
Chemolumineszenz von Teilentladungen

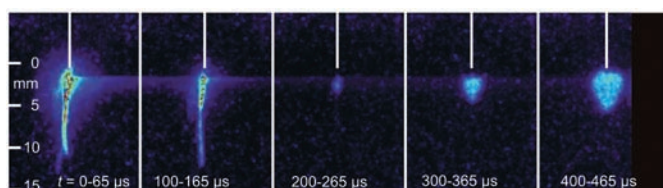


Bild 3:  
Zündung eines Wasserstoff/Luft-Gemisches durch Teilentladungen



## Metrology for advanced industrial magnetics

**This is an announcement of an applied research project to improve the metrology of magnetic sensors for industrial applications. The joint European project entitled MetMags started in July 2011. Companies who want to follow the findings of the project are most welcome to contact the participants.**

### Motivation

Magnetic sensors can be found in a broad range of products in various industrial fields like consumer electronics, information and communication technology, and the automotive industry. The fast product development in these fields creates the need for advanced magnetic sensors, which have significantly improved specifications with respect to resolution, reliability, size, signal-to-noise ratio, and operation temperature, among others. To verify the sensor specifications and to enable advanced sensor development requires an underpinning metrology for their testing, characterization, and calibration. For example the down scaling of sub-micron anisotropic magneto resistance (AMR) sensors is presently hindered by uncontrolled nano-scale defects in the AMR sensor film which can degrade the sensor response and increase the sensor noise level.

### Objectives

The main goals of the five technical work packages are:

- Extending metrology to the development and testing of advanced AMR sensors, especially for the evaluation and detection of nano-scale defects in sub-micron sensor devices.
- Expanding the parameter range of traceable calibration of advanced magnetic sensors to meet present and future stakeholder requirements e.g. by providing traceable calibration in elevated temperatures.
- Designing metrological tools for traceable characterization and industrial in line testing of spin torque sensor materials and devices e.g. based on an inductive probe technology.
- Developing procedures to validate micromagnetic simulation tools used for sensor development.
- Establishing metrology for the characterization of future advanced magnetic and spintronic sensor concepts such as domain wall sensors or ultra small hall sensors.

### Dissemination

The results of these technical work packages will be disseminated to the European stakeholders e.g. by providing new measurement tools and services, by providing best practice guides for sensor calibration, or by providing validated micromagnetic modelling codes.

### In brief

- 3 year European project for magnetic sensor improvement
- Calibration, modelling and in-line testing are research goals
- Stakeholders are welcome to follow findings

### Partners and Associates

PTB, Germany  
CMI, Czech Republic  
INRIM, Italy  
NPL, United Kingdom  
TUBITAK-UME, Turkey  
Hitachi Europe, United Kingdom  
University of Bielefeld, Germany

Dr. habil.  
Hans-Werner Schumacher  
(Project Coordinator)  
Semiconductorphysics and  
Magnetism (IND 08)  
Phone: +49 531 592-2500  
E-mail:  
hans.schumacher@ptb.de

[www.ptb.de/emrp/metmags-project.html](http://www.ptb.de/emrp/metmags-project.html)

## Metrology aims at ultra-precise form characterization of any optical surface

### In brief

- 3 year European research project for form measurement of optical elements
- Improvements of measurements and reference standards are research goals
- Stakeholders and collaborators are welcome to join the project

### Partners and Associates

CMI, Czech Republic  
 EJPD/METAS, Switzerland  
 LNE, France  
 MKEH, Hungary  
 PTB, Germany  
 SMD, Belgium  
 VSL, Netherlands  
 IBS Precision Engineering bv, Netherlands  
 Fraunhofer IPT, Germany  
 TNO, Netherlands  
 TU Ilmenau/IPMS, Germany  
 University Stuttgart/ITO, Germany  
 XPRESS, Netherlands

Dr. Michael Schulz  
 (Project Coordinator)  
 Optical and tactile metrology for absolute form characterization (IND10)  
 Phone: +49 531 592-4210  
 E-mail: michael.schulz@ptb.de

[www.ptb.de/emrp/ind10-home.html](http://www.ptb.de/emrp/ind10-home.html)

Measuring flats and aspheres to an accuracy < 1 nm remains a challenge on an industrial level as of today. Thus, in September 2011 the European Union has started a € 2.9 mill. project for a three year period to measure high quality optical surfaces of lenses and mirrors directly traceable to the SI-units. It encompasses a multitude of national metrology institutes (NMI) and other stake holders. Collaborators are welcome to join the project.

### Motivation

European Optics and Photonics industries hold a major competitive advantage in today's world market. Even though most of the mass production of optical components is done overseas by now, Europe has a leading role in high-end optical products, ultra-precise manufacturing and inspection systems. Current techniques allow for manufacturing even arbitrary optical surfaces. The surface of these elements can be corrected at the nanometre scale by computer controlled polishing or ion beam etching. However, the inaccuracy of absolute and traceable form metrology is limiting the manufacturing of modern optical elements. This holds in particular for aspheres. To achieve fundamental improvements on the nanometre scale is the goal of the current project.

### Objectives

The intention of this project is to bring together experts from different communities, including optical (imaging) metrology and (single point) coordinate measuring technique. The interdisciplinary research will enable to resolve uncertainty influences of the particular techniques and thus helps to improve the measurement accuracy. The joint project will facilitate a significant advancement in form metrology of optical surfaces. The five main technical work packages aim at:

- Extending flatness metrology for reference surfaces down to the (sub-) nanometre range.
- Improving lateral resolution below 100 µm even for large specimen.
- Realizing an optical asphere metrology system based on Tilted Wave Interferometry (TWI) and traceable stitching techniques.
- Improving single point scanning techniques for asphere metrology
- Providing calibrated form standards for asphere metrology systems.

### Dissemination

The results of these technical work packages will be disseminated to the European stakeholders e.g. by providing new measurement instruments and services, by providing good practice guides on form metrology, by organizing workshops and training courses.

## Metrology to reduce thermal effects and drift in precision engineering

**Current state of the art temperature measurement equipment needs regular re-calibration, which increases the down time of instruments and the costs in industrial production. Therefore, in September 2011 the European Union started a project for a three year period to analyse drift effects including aging, thermal expansion, temperature dependence of hardness and creep of materials, joints and sensors.**

**The aim is to contribute to a metrological knowledge base for material properties and related metrological standardisation. It encompasses a multitude of national metrology institutes (NMI) and other stake holders. Collaborators are welcome to join the project.**

### Motivation

Precision engineering and new materials are the basis of many goods in daily life and high-end applications. With current trends in precision engineering higher accuracies for industrial high-end production and measurement equipment, especially from ICT or aerospace industries, temperature effects and time-dependent drift are a serious limitation for achievable system performance. To overcome the thermal and drift limitations of current precision engineering tools, an improved temperature insensitive design of machine components will be necessary. Improved precision engineering tools using thermal insensitive design principles are beneficial not only for tool manufacturers but also for European key-industries, in particular for smaller companies, in terms of more efficient production processes and reliable, better products. This is an important condition to ensure a competitive advantage of European industries on the world market. The results of the project will also help to reduce the number of defective parts, leading to savings in raw materials, and reductions of machine time per part.

### Objectives

The aim of this JRP is the measurement of thermal and aging properties of machine components and the development of tools for thermal design optimizations and temperature control allocated to four work packages:

- Development and optimisation of measurement tools for stability measurements with uncertainties down to 0.1 nm over a year and 0.01 nm for a day.
- Measurement of relevant material and joint properties
- Development of reliable and stable temperature measurement tools and sensors with mK uncertainties over years.
- Tools and thermal modelling and active temperature control.

### Dissemination

From this work a guideline for the use of thermal modelling in machine tool design will be derived.

### In brief

- 3 year European project for developing tools for thermal design optimizations
- Tools, thermal modelling and active temperature control are research goals
- Stakeholders are welcome to follow findings

### Partners and Associates

PTB, Germany  
NPL, United Kindom  
LNE, France  
VSL, Netherlands  
ENSMA, France  
FhG, Germany

Dr. Jens Flügge  
(Project Coordinator)  
T3D  
(IND13)  
Phone: +49 531 592-5200  
E-mail: jens.fluegge@ptb.de

<http://projects.npl.co.uk/T3D/project.html>







## Aktuelles aus der OIML

### Bericht über die 14. Internationale Konferenz der OIML und die 47. Sitzung des CIML in Bukarest

Roman Schwartz\*

Die 14. Konferenz der Internationalen Organisation für das gesetzliche Messwesen (OIML) und die 47. Sitzung des Internationalen Komitees für das gesetzliche Messwesen (CIML) fanden vom 1. bis 5. Oktober 2012 in Bukarest, Rumänien, statt. Insgesamt nahmen knapp 170 Delegierte und Beobachter aus 48 (von 57) Mitgliedstaaten, 12 korrespondierenden Mitgliedstaaten sowie mehreren internationalen Organisationen teil. Die internationale Konferenz findet im vierjährigen Turnus statt; ihr obliegt die Entscheidung über Grundsatzfragen und das Budget der OIML. Das CIML tagt jährlich, wählt den Präsidenten und die beiden Vizepräsidenten der OIML, genehmigt den Strategie-, Prioritäten- und Aktionsplan, überwacht die technischen Arbeiten und das Internationale Büro für das gesetzliche Messwesen (BIML) in Paris. Zur deutschen Delegation gehörten neben dem Autor Dr. Norbert Schultes, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), und Johann Fischer, Direktor des Landesamtes für Mess- und Eichwesen Berlin-Brandenburg, als Vertreter der Bundesländer. Darüber hinaus nahm Prof. Manfred Kochsiek als OIML-Ehrenmitglied und ehemaliger OIML-Präsident an den Sitzungen teil.

Die wichtigsten Entscheidungen und Entwicklungen werden nachfolgend vorgestellt.

Alle Resolutionen der 14. OIML-Konferenz und der 47. CIML-Sitzung finden sich unter [1].

#### 1 Neue OIML-Mitgliedstaaten

Kolumbien wird der OIML voraussichtlich im Jahr 2013 als 58. Mitgliedstaat beitreten. Die Zahl der korrespondierenden Mitgliedstaaten hat sich durch den Beitritt von Gambia, Liberia, Malawi, Mauretanien, Namibia, Nigeria und Sierra Leone auf 64 erhöht.

Ein positiver Effekt der Erhöhung der Mitgliederzahl ist, dass erstmals in der Geschichte der OIML die Mitgliedsbeiträge im Zeitraum von 2013 bis 2016 leicht (um 3,4 %) gesenkt werden können.

Dazu beigetragen haben auch die erfolgreichen Bemühungen des neuen BIML-Direktors, Stephen Patoray, um klarere und effizientere Arbeitsstrukturen im BIML.

#### 2 Zusammenarbeit mit anderen Organisationen

In seinem Bericht hob der OIML-Präsident, Peter Mason (UK), hervor, dass die OIML über die bereits guten, regelmäßigen Arbeitskontakte hinaus eine noch stärkere Zusammenarbeit mit der Meterkonvention bzw. dem BIPM suche. Ein Zeichen der guten Zusammenarbeit war u. a. die Teilnahme des designierten nächsten BIPM-Direktors, Dr. Martin Milton, an beiden Tagungen. Peter Mason betonte darüber hinaus den Wunsch der OIML, die Zusammenarbeit mit den regionalen Organisationen für das gesetzliche Messwesen (RLMO) sowie das System der gegenseitigen Anerkennung von Prüfergebnissen weiter zu stärken.

Gute Kontakte bestehen auch zu den internationalen Organisationen ISO, IEC, ILAC, IAF und CECIP, dem europäischen Verband der Waagenhersteller.

#### 3 Neue technische Richtlinien der OIML

Wichtigste Arbeitsgrundlage für alle technischen Aktivitäten in den Technischen Komitees (TCs) und Subkomitees (SCs) der OIML ist das Dokument B 6 „Directives for OIML technical work“ mit den Teilen 1 „Structures and procedures for the development of OIML publications“ und 2 „Guide to the drafting and presentation of OIML publications“ [2]. Dieses Dokument wurde 2011 in erheblich überarbeiteter Form verabschiedet und veröffentlicht. Es enthält als wesentliches neues Element sogenannte Projektgruppen (PGs), in denen zukünftig alle technischen Arbeiten unterhalb der TC- und SC-Ebene vorangebracht werden. Bei der diesjährigen CIML-Sitzung wurde nun eine weitere Revision des Dokuments B 6

\* Dir. u. Prof. Dr. Roman Schwartz, Leiter der Abteilung „Mechanik und Akustik“ der PTB, deutsches Mitglied im Internationalen Komitee für das Gesetzliche Messwesen (CIML) und 1. CIML-Vizepräsident

verabschiedet, mit der einige Klarstellungen und Ergänzungen erfolgt sind, z. B. wurde eine Übersicht mit allen Abstimmungsregeln ergänzt, die Rolle und Aufgaben der CIML-Mitglieder, des BIML, der TCs, SCs und PGs klarer definiert, die Gründung, der laufende Betrieb und die Auflösung von TCs, SCs und PGs klarer definiert und strukturiert, sowie die Entwicklung, Abstimmung und Verabschiedung von OIML-Publikationen, einschließlich Revisionen und Ergänzungen (amendments) klarer beschrieben.

Durch eine separate Resolution wurde die übliche Praxis noch einmal bestätigt, dass korrespondierende OIML-Mitgliedstaaten auf Wunsch in TCs, SCs und PGs als „O-member“, d. h. als Beobachter ohne Stimmrecht, mitarbeiten können.

#### 4 Anerkennung von Hersteller-Prüfergebnissen

Die PTB hat sich schon lange dafür eingesetzt, dass Hersteller-Prüfergebnisse unter bestimmten Bedingungen auch im Rahmen des OIML Mutual Acceptance Arrangements (MAA) anerkannt werden, und nicht nur im Rahmen des sogenannten OIML-Basis-Zertifizierungssystems. Mit der Verabschiedung der entsprechenden Ergänzung zum OIML-Dokument B 10 „Framework for a Mutual Acceptance Arrangement on OIML Type Evaluations“ [2] ist der Weg dafür jetzt endlich frei geworden.

Hiermit kann nun eine „OIML Issuing Authority“, beispielsweise die PTB, unter bestimmten Voraussetzungen, wie sie im B 10 Amendment genau festgelegt sind, ein Prüflabor eines interessierten Herstellers zusätzlich zu ihrem eigenen Prüflabor benennen. Sobald dieses einen bestimmten, ebenfalls genau festgelegten Begutachtungsprozess erfolgreich durchlaufen hat, wird es als offizielles Prüflabor der betreffenden Issuing Authority in das schriftliche Abkommen zur gegenseitigen Anerkennung aufgenommen. Solche schriftliche Abkommen im Rahmen des MAA, sogenannte „Declarations of Mutual Confidence“ (DoMCs), gibt es zur Zeit für folgende Messgerätearten: Nichtselbsttätige Waagen (OIML R 76), Wägezellen (OIML R 60) und Wasserzähler (OIML R 49) [3].

Um die internationale Akzeptanz für diese Regelung zu erhöhen, wurde als Übergangslösung vereinbart, dass OIML-MAA-Zertifikate, bei denen Hersteller-Prüfergebnisse verwendet worden sind, von anderen DoMC-Partnern vorerst freiwillig anerkannt werden. Ziel ist es, nach einiger gewissen Zeit Bilanz zu ziehen und zu prüfen, ob auf dieses Freiwilligkeitsprinzip verzichtet werden kann.

#### 5 Verabschiedete und sanktionierte OIML-Publikationen

**Folgende „Recommendations“ wurden verabschiedet und von der OIML-Konferenz sanktioniert:**

- R 35-2:2011 *Material measures of length for general use. Part 2: Test methods*
- R 35-3:2011 *Material measures of length for general use. Part 3: Test report format*
- R 46-1 and R 46-2:2012 *Active electrical energy meters*
- R 80-1:2009 *Road and rail tankers with level gauging. Part 1: Metrological and technical requirements*
- R 106-1:2011 *Automatic rail-weighbridges. Part 1: Metrological and technical requirements - Tests*
- R 106-2:2012 *Automatic rail-weighbridges. Part 2: Test report format*
- R 120:2010 *Standard capacity measures for testing measuring systems for liquids other than water*
- R 126:2012 *Evidential breath analyzers*
- R 134-2:2009 *Automatic instruments for weighing road vehicles in motion and measuring axle loads. Part 2: Test report format*
- R 137-1&2:2012 *Gas meters. Part 1: Metrological and technical requirements and Part 2 Metrological controls and performance tests*
- *Amendment (2009) to R 138:2007 Vessels for commercial transactions*
- R 143:2009 *Instruments for the continuous measurement of SO<sub>2</sub> in stationary source emissions*

Nach OIML-Konvention (OIML B 1) haben die Mitgliedstaaten die moralische Verpflichtung, diese OIML-Empfehlungen so weit wie möglich in die nationale Gesetzgebung zu übernehmen.

**Folgende „Documents“ wurden verabschiedet und sanktioniert:**

- D 1:2012 *Considerations for a law on metrology*
- D 16:2011 *Principles of assurance of metrological control*

Im Gegensatz zu OIML-Empfehlungen (Recommendations) besteht bei „Documents“ keine moralische Verpflichtung der Mitgliedstaaten zur Implementierung.

### Folgende „Basic Publications“ wurden vom CIML verabschiedet:

- B 6-1:2012 Directives for OIML technical work. Part 1: Structures and procedures for the development of OIML publications
- B 6-2:2012 Directives for OIML technical work. Part 2: Guide to the drafting and presentation of OIML publications
- B 8:2012 OIML Financial Regulations
- Amendment (2012) to B 10:2011 Framework for a Mutual Acceptance Arrangement on OIML Type Evaluations
- B 15:2011 OIML Strategy

Alle OIML-Publikationen stehen unter [2] frei zur Verfügung.

## 6 Zurückgezogene OIML-Publikationen

### Folgende OIML-Empfehlungen und -Dokumente wurden zurückgezogen:

- R 70 Determination of intrinsic and hysteresis errors of gas analyzers
- R 73 Requirements concerning pure gases CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> and Ar intended for the preparation of reference gas mixtures
- D 7 The evaluation of flow standards and facilities used for testing water meters

## 7 Neue, geänderte und aufgelöste Projekte

### Folgende neue Projekte wurden beschlossen:

TC/SC	Titel	Projektleitung
TC 17/SC 7	Revision von R 126:2012 <i>Evidential breath analyzers</i>	Frankreich/ Deutschland
TC 3/SC 3	Neues OIML-Dokument <i>General Requirements for the program of reference material certification</i>	Russland
TC 8/SC 7	Ergänzung der R 137:2012 <i>Gas Meters</i>	Niederlande

### Folgende Projekte werden in andere laufende Projekte überführt:

Projekt	Titel	Zusammengeführt mit:
TC 3/p 1	Revision von R 34 <i>Accuracy classes of measuring instruments</i>	TC 3/SC 1/p 1
TC 3/p 2	Revision von D 3 <i>Legal qualification of measuring instruments</i>	TC 3/SC 1/p 1
TC 3/p 5	Revision von R 42 <i>Metal stamps for verification officers</i>	TC 3/SC 1/p 1
TC 3/SC 1/p 2	Revision von D 20 <i>Initial and subsequent verification of measuring instruments and processes</i>	TC 3/SC 1/p 1
TC 6/p 4	<i>Methods for determining the quantity of product in prepackages</i>	TC 6/p 3
TC 10/SC 2/p 3	Revision von R 109 <i>Pressure gauges and vacuum gauges with elastic sensing instruments (standard instruments)</i>	TC 10/SC 2/p 2
TC 16/SC 4/p 2	<i>FTIR (Fourier transform infrared) spectrometers for measurement of air pollutants</i>	TC 16/SC 4/p 3
TC 17/SC 7/p 2	<i>Test procedures and test report format for the evaluation of portable breath testers used in open air</i>	TC 17/SC 7/p 1
TC 18/SC 4/p 2	<i>Electrocardioscopes – metrological characteristics – methods and means for verification</i>	TC 18/SC 4/p 4
TC 18/SC 4/p 3	<i>Digital electrocardiographs and electrocardioscopes – metrological characteristics – methods and means for verification</i>	TC 18/SC 4/p 4
TC 18/SC 4/p 5	<i>Analyzing electrocardiographs. Metrological requirements. Methods and means of verification</i>	TC 18/SC 4/p 4



**Folgende Projekte wurden umbenannt:**

Projekt	Alter Titel	Neuer Titel
TC 3/SC 1/p 1	Revision von D 19 <i>Pattern evaluation and pattern approval</i>	Kombinierte Revision von D 19 und D 20 unter Einbeziehung bestimmter Elemente aus R 34
TC 10/SC 2/p 2	Revision von R 101 <i>Indicating and recording pressure gauges, vacuum gauges and pressure-vacuum gauges with elastic sensing instruments (ordinary instruments)</i>	Kombinierte Revision von R 101 und R 109
TC 16/SC 4/p 3	Revision von D 22 <i>Guide to portable instruments for assessing airborne pollutants arising from hazardous wastes</i>	Noch festzulegen
TC 18/SC 4/p 4	Revision von R 90 <i>Electrocardiographs</i>	Revision von R 90 <i>Electrocardiographs, electrocardioscopes and electrocardioanalysers. Metrological characteristics. Method and equipment for verification</i>

**Folgende Projekte wurden aufgelöst:**

Projekt	Titel
TC 13/p 2	Revision von R 103 <i>Measuring instrumentation for human response to vibration</i>
TC 13/p 4	Revision von R 104 <i>Pure-tone audiometers</i>
TC 13/p 5	Kombinierte Revision der R 58 <i>Sound level meters</i> und der R 88 <i>Integrating-averaging sound level meters</i>
TC 18/SC 4/p 1	<i>Electrodes for electrocardiographs and electroencephalographs – methods and means for verification</i>

**8 OIML-Stellungnahme zum neuen SI**

In Erwidern der Resolution 1 (2011) der Generalkonferenz für Maß und Gewicht (CGPM) [4] hatte das CIML im Jahr 2011 alle CIML-Mitglieder und die betroffenen technischen Komitees dazu aufgerufen, sich aktiv an der Diskussion um die Revision des Internationalen Einheitensystems (SI) zu beteiligen und Kommentare an eine entsprechende OIML-Arbeitsgruppe zu übermitteln. Die Ergebnisse wurden bei der diesjährigen CIML-Sitzung vorgestellt und folgende offizielle Stellungnahme verabschiedet und dem BIPM übermittelt:

*Die OIML unterstützt die Absicht des CGPM, das Internationale Einheitensystem (SI) zu revidieren, so dass es auch im 21. Jahrhundert den Anforderungen von Wissenschaft, Technologie und Wirtschaft genügt.*

*Aufgrund einer Umfrage unter den betreffenden technischen Komitees der OIML, TC 2, TC 9, TC 9/SC 3 und TC 11, sowie allen CIML-Mitgliedern, wird erwartet, dass die neuen SI-Definitionen wenig oder gar keine Auswirkungen auf Routine-messungen von Zeit, Länge, Lichtstärke, elektri-*

*schem Strom, Temperatur und Stoffmenge sowie den abgeleiteten Größen haben werden.*

*Einen möglichen Einfluss könnte die Neudefinition des Kilogramm auf Massebestimmungen hoher Genauigkeit bei Verwendung von Gewichtstücken der Genauigkeitsklassen E (E1 und E2) nach der OIML-Empfehlung R 111 haben. Deshalb sieht es die OIML als fundamental wichtig an, dass die Empfehlungen des CCM (das beratende Komitee für Masse und abgeleitete Größen) aus dem Jahr 2010 bezüglich der Neudefinition des Kilogramm genau eingehalten werden, um mögliche negative Auswirkungen auf Routine-Massebestimmungen zu vermeiden.*

*Die OIML unterstützt die Absicht des CGPM, die Formulierungen der neuen Definitionen der SI-Basisgrößen weiter zu verbessern, so dass das „neue SI“ auch weiterhin für seine Nutzer verständlich bleibt.*

Der vollständige Originalwortlaut der Resolution Nr. 23 (2012) findet sich unter [1]. Nähere Erläuterungen der Vorschläge zum neuen SI als auch zu den Ergebnissen der OIML-Umfrage werden im OIML-Bulletin veröffentlicht [5].

## 9 Weitere Beschlüsse, Personalien und Ehrungen

Die Position des ehrenamtlichen „Vermittlers für Angelegenheiten der Entwicklungsländer“, die mehrere Jahre von Dr. Eberhard Seiler, dem ehemaligen Leiter des Fachbereichs „Technische Zusammenarbeit“ der PTB, wahrgenommen worden war, wurde wegen mangelnder Resonanz in den betreffenden Ländern aufgelöst. Stattdessen wurde ein für Entwicklungshilfeaktivitäten vorgesehener Posten im OIML-Haushalt beschlossen, mit dem die OIML und insbesondere das BIML zukünftig z. B. Workshops und andere Informationsveranstaltungen zum gesetzlichen Messwesen in Entwicklungshilfeländern und -regionen unterstützen wird. Weiterhin beibehalten wird die von Dr. Seiler initiierte OIML-Auszeichnung für „exzellente Beiträge von Entwicklungsländern zum gesetzlichen Messwesen“, der im letzten Jahr an Juan Carlos Castillo (Bolivien) und José Dajes (Peru) vergeben worden war und in diesem Jahr von J. Dajes persönlich entgegengenommen wurde. Den diesjährigen OIML-Award erhielt auf Vorschlag der PTB Lokoumanou Osséni (Benin).

OIML-Medaillen für ihre Verdienste auf dem Gebiet des gesetzlichen Messwesens erhielten Pu Changcheng (AQSIQ, China) und Philippe Leclercq (BIML, Frankreich). Weitere Auszeichnungen erhielten Galitsyna Lyubov (Kasachstan, Letter of appreciation) und das Direktorat für Metrologie (Indonesien, Letter of appreciation).

Nach Ablauf seiner 6-jährigen Amtszeit als 1. Vizepräsident des CIML trat Dr. Graham Harvey (NMI, Australien) aus Altersgründen zurück. Als neuer 1. Vizepräsident wurde Dr. Roman Schwartz (PTB) berufen. Damit ist die Position des 2. CIML-Vizepräsidenten zur Zeit vakant und wird 2013 ausgeschrieben.

## 10 Termine

Die 48. CIML-Sitzung wird 2013 in Ho Chi Min City (Vietnam) stattfinden. Weitere OIML-Veranstaltungen und Termine finden sich unter [6,7].

## 11 Referenzen

- [1] <http://www.oiml.org/download/>
- [2] <http://www.oiml.org/publications/>
- [3] <http://www.oiml.org/maa/domcs.html>
- [4] [http://www.bipm.org/en/si/new\\_si/](http://www.bipm.org/en/si/new_si/)
- [5] R. Schwartz, Ph. Richard, Ch. Ehrlich, Y. Miki, „The proposed new SI and consequences for legal metrology“, OIML Bulletin, 2013 (to be published)
- [6] <http://www.oiml.org/>
- [7] <http://www.oiml.org/updates/calendar.html>

# Regeln für die Durchführung von Vergleichsmessungen von Dosimetern gemäß § 2 Abs. 3 Satz 3 der Eichordnung

## 1 Vorbemerkung

Nach § 2 Absatz 3 Satz 3 und 5 der Eichordnung vom 12. Aug. 1988 (BGBl. I S. 1657) sind von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) oder von einer Institution, die von der zuständigen Behörde im Benehmen mit der PTB anerkannt ist, regelmäßig Vergleichsmessungen für Dosimeter zu veranstalten. Die PTB gibt hiermit die Aktualisierung der bisherigen Regeln (PTB-Mitt. 100 (1990) Nr. 3) für die Vergleichsmessungen bekannt, die von ihr veranstaltet werden. Bei der Überarbeitung wurden unter Punkt 5 die Empfehlung der Strahlenschutzkommission „Anforderungen an Personendosimeter“, verabschiedet in der 247. Sitzung am 24./25. Februar 2011, berücksichtigt. Weiterhin wurden Erfahrungen aus den bisherigen Vergleichsmessungen eingearbeitet.

## 2 Dosimeter

Diese Regeln gelten für bauartzugelassene Thermolumineszenz-Dosimeter, Photolumineszenz-Dosimeter, Exoelektronen-Dosimeter und Film dosimeter, die gemäß § 2 Abs. 3 Satz 3 der Eichordnung regelmäßig an Vergleichsmessungen teilzunehmen haben.

## 3 Zusendung und Bestrahlung der Dosimetersonden

Die PTB erhält von der Dosimetriestelle unaufgefordert

- pro zugelassener Dosimeterbauart eines Film dosimeters 13 Dosimetersonden zum Ersten jeden Monats und
- pro zugelassener Dosimeterbauart eines Thermolumineszenz-Dosimeters, Photolumineszenz-Dosimeters und Exoelektronen-Dosimeters 13 Dosimetersonden zum 1. Januar, 1. April, 1. Juli und 1. Oktober jeden Jahres.
- pro zugelassener Dosimeterbauart müssen der PTB jedes Jahr Dosimetersonden aus der aktuellen Charge zugesendet werden, andernfalls ist die Zustimmung der PTB notwendig.

Je nach der Entscheidung der PTB werden bis zum Eintreffen der nächsten Dosimetersonden Bestrahlungen durchgeführt oder nicht. Erfolgen keine Bestrahlungen, werden die zuvor erhaltenen Dosimetersonden je nach Absprache mit der Dosimetriestelle zurückgeschickt oder vernichtet.

Hält es die PTB für erforderlich, Bestrahlungen durchzuführen, werden pro zugelassener Dosimeterbauart 10 Dosimetersonden bestrahlt, wobei die bei der Bauartzulassung festgelegten Nenngebrauchsbereiche der Einflussgrößen (Photonenenergie, Einfallrichtung, usw.) eingehalten werden. Dann werden alle 13 erhaltenen Dosimetersonden an die für die Dosimetriestelle zuständige Behörde weitergeleitet. Zwei der unbestrahlten Dosimetersonden kann die Dosimetriestelle zur Bestimmung der

Transportdosis benutzen. Eine Dosimetersonde dient als Reserve (z. B. bei Ausfällen der Bestrahlungsapparatur). Für jede bestrahlte Dosimetersonde wird, wie im Routinebetrieb der Messstelle üblich, der Photonenenergiebereich bzw. das Radionuklid angegeben.

## 4 Auswertung der Dosimetersonden und Mitteilung der Ergebnisse

Die Dosimetriestelle teilt der PTB und der zuständigen Behörde die Betriebszeiten des Dosimeters mit. Innerhalb dieser Betriebszeit bringt ein sachkundiger Eichbediensteter die von der PTB erhaltenen Dosimetersonden bzw. Detektoren so frühzeitig zur Dosimetriestelle, dass sie im Beisein des Eichbediensteten innerhalb eines Tages ausgewertet werden können. Der Eichbedienstete greift nicht in den Auswertevorgang ein. Unmittelbar nach der Auswertung sind die Messergebnisse der Dosimetriestelle dem Eichbediensteten auszuhändigen, der sie dann umgehend an die PTB weiterleitet, gegebenenfalls mit einer Auflistung der von ihm festgestellten Abweichungen vom Routinebetrieb des Dosimeters, wie er in der Gebrauchsanweisung festgelegt ist. Die PTB teilt der Dosimetriestelle das Ergebnis der Vergleichsmessungen mit, aus dem hervorgeht, ob maximal zulässige Messabweichungen (Abs. 5) überschritten und Abweichungen vom Routinebetrieb festgestellt wurden. Die zuständige Behörde wird von der Dosimetriestelle informiert (§ 2 Abs. 3 Satz 6 der Eichordnung).

## 5 Maximal zulässige Messabweichungen

Ist  $H_D$  der von der Dosimetriestelle bestimmte Äquivalentdosiswert und  $H_{PTB}$  der zugehörige Äquivalentdosiswert der PTB, so muss bei einer Vergleichsmessung in mindestens 90 % der Fälle das Verhältnis  $H_D/H_{PTB}$  der Dosiswerte die Bedingung

$$\frac{1}{1,4} \left( 1 - \frac{2H_0}{H_0 + H_{PTB}} \right) \leq \frac{H_D}{H_{PTB}} \leq \frac{1}{0,6} \left( 1 - \frac{H_0}{4H_0 + H_{PTB}} \right)$$

erfüllen. Darin ist  $H_0$  die untere Grenze des Geltungsbereiches dieser Beziehung. Es ist

$H_0 = 0,1$  mSv für Ganzkörperdosimeter und

$H_0 = 1,0$  mSv für Teilkörperdosimeter.

## 6 Häufigkeit der Vergleichsmessungen

Die Vergleichsmessungen werden in der Regel einmal jährlich veranstaltet. Je nach der Messbeständigkeit der Dosimeter können Vergleichsmessungen aber auch in anderen zeitlichen Abständen veranstaltet werden.

## 7 Inkrafttreten

Vergleichsmessungen nach diesen Regeln werden ab 1. August 2011 durchgeführt.