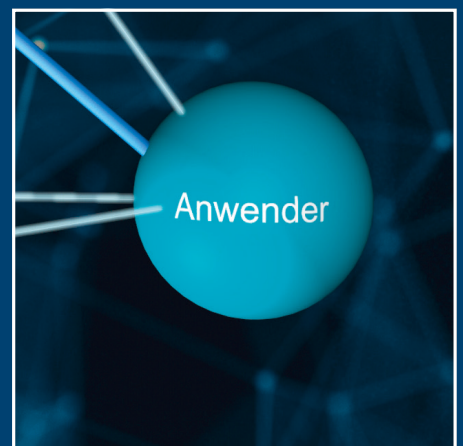


Metrologie für die Digitalisierung von Wirtschaft und Gesellschaft

Metrology for the Digitalization of the Economy and Society



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

127. Jahrgang, Heft 4, Dezember 2017

**Metrologie für die Digitalisierung
von Wirtschaft und Gesellschaft**

Metrology for the Digitalization of the Economy and Society



Liebe Leserinnen und Leser der PTB-Mitteilungen,

wenn Sie jetzt einmal eine Seite zurückblättern und dort lesen, in welchem Jahrgang sich die PTB-Mitteilungen befinden, dann beschleicht Sie vielleicht auch, ebenso wie den Schreiber dieses Vorworts, eine gewisse Ehrfurcht vor dem Alter. Auf 127 Jahre können schließlich nicht viele zurückblicken. Aber die PTB-Mitteilungen sind wahrlich kein typischer Senior, sind sie doch frei von allen altersbedingten Krankheiten und Ausfallerscheinungen. Vielmehr schaffen es die PTB-Mitteilungen, sich immer wieder zu erneuern. Der letzte große Verjüngungsprozess liegt nun allerdings auch schon 18 Jahre zurück. Beginnend mit dem Jahr 2000 wurden aus den PTB-Mitteilungen, die bis dato in jedem Heft unterschiedlichste Fachaufsätze von Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen der PTB versammelten, monothematische Hefte, die sich jeweils einem metrologischen Teilgebiet widmeten. Mit dieser inhaltlichen Neujustierung konnten die PTB-Mitteilungen und konnten hoffentlich auch Sie, die Leser, gut leben. Diese prinzipielle Ausrichtung wollen die PTB-Mitteilungen auch beibehalten.

Gemäß der Weisheit, dass nur der Wandel eine Konstante darstellt, wollen sich die PTB-Mitteilungen zugleich klug verhalten und sich auf geänderte Rahmenbedingungen einstellen. Und diese Rahmenbedingungen verlangen einen grundsätzlichen, strukturellen Wandel, den auch Sie als Leser deutlich spüren werden. Die PTB-Mitteilungen werden, beginnend mit dem Jahr 2018, nicht mehr als Verlagsprodukt kostenpflichtig vertrieben, sondern sie werden sich als „open access“-Veröffentlichung unter dem Dach der PTB präsentieren, frei zugänglich für jeden Interessierten. Diese Veränderung hin zu einer originären Online-Veröffentlichung entspricht einerseits der PTB-Politik eines freien Zugangs zu allen veröffentlichten Arbeitsergebnissen, und ist andererseits auch ein Instrument, um das Journal formal und inhaltlich flexibler aufzustellen, als es einer Verlagspublikation angemessen ist.

Wenn Sie in Zukunft an die PTB-Mitteilungen denken, dann denken Sie bitte nicht mehr in den Schemata gedruckter Hefte, sondern denken Sie bitte an die Heimat-Webseite der PTB-Mitteilungen:

<https://www.ptb.de/cms/presseaktuelles/zeitschriften-magazine/ptb-mitteilungen.html>

Der gewohnte Veröffentlichungsrhythmus (jeweils am Ende eines Quartals) soll jedoch auch in dieser digitalen Zukunft beibehalten werden. Wir werden einen speziellen Mitteilungs-Newsletter einrichten, mit dem wir Sie stets auf dem Laufenden halten, wenn eine neue Mitteilungsausgabe online gestellt wird. Bitte informieren Sie uns kurz, ob Sie unseren Newsletter dazu kostenfrei abonnieren wollen. Bitte verwenden Sie folgende Mailadresse, um sich für diesen Service anzumelden:

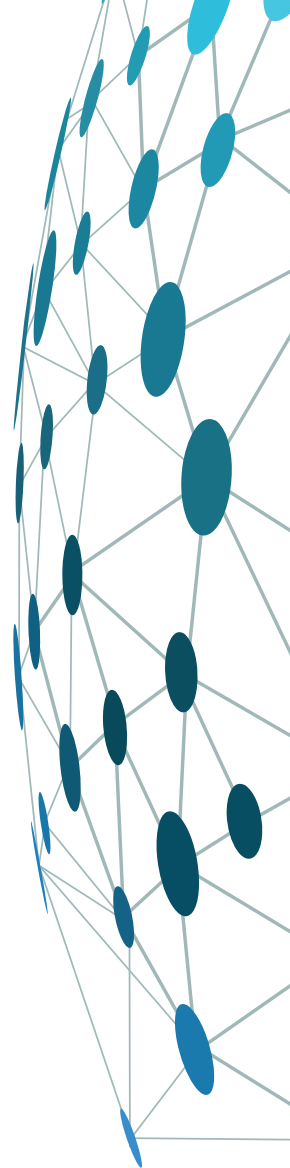
presse@ptb.de (bitte unter dem Betreff „PTB-Mitteilungen“)

Auf diesem Weg bleibt Ihre informatorische, metrologische Grundversorgung sichergestellt.

Mit vielen freundlichen Grüßen aus der Redaktion der PTB-Mitteilungen

Jens Simon

PS: Unserem Verlag – früher dem Wirtschaftsverlag NW, heute dem Schünemann Verlag – möchten wir an dieser Stelle ein großes „Dankeschön!“ zurufen für eine stets reibungslose, unkomplizierte und konstruktive Zusammenarbeit. Eine bessere Verlagsheimat hätten sich die PTB-Mitteilungen nicht wünschen können.



Inhalt / Content

Metrologie für die Digitalisierung von Wirtschaft und Gesellschaft Metrology for the Digitalization of the Economy and Society

▪ Vorwort [□]	5
<i>Sascha Eichstädt</i>	
▪ Foreword [□]	7
<i>Sascha Eichstädt</i>	
▪ PTB-Digitalisierungsstrategie [□]	11
<i>Editor Sascha Eichstädt</i>	
▪ PTB Digitalization Strategy [□]	41
<i>Editor Sascha Eichstädt</i>	
▪ Mathematics and Statistics for Digitalization [□]	69
<i>Markus Bär and Clemens Elster</i>	
▪ The Digital Calibration Certificate [□]	75
<i>Siegfried Hackel, Frank Härtig, Julia Hornig, Thomas Wiedenhöfer</i>	
▪ A Digital Quality Infrastructure for Europe: The European Metrology Cloud [□]	83
<i>Florian Thiel, Marko Esche, Federico Grasso Toro, Daniel Peters, Alexander Oppermann, Jan Wetzlich, Maximilian Dohlus</i>	
▪ Software and ICT-related Challenges in Legal Metrology [□]	99
<i>Florian Thiel</i>	

Aktuelles aus der OIML

▪ Bericht über die 52. Sitzung des CIML in Cartagena de Indias, Kolumbien	103
<i>Roman Schwartz, Peter Ulbig</i>	

PTB-Innovationen

▪ Ausgesuchte Technologieangebote und Erfolgsgeschichten	107
--	-----

Vorwort

Sascha Eichstädt¹

Die Digitalisierung ist ein Transformationsprozess, der in zunehmendem Maße alle Aspekte von Industrie, Wirtschaft und Gesellschaft betrifft. Das Grundkonzept der digitalen Transformation unterscheidet sich vom technischeren Begriff der Digitalisierung dadurch, dass sie nicht bei der Übersetzung von Analogwerten in digitale Einheiten aufhört. Stattdessen werden die digitalen Entitäten als Ausgangspunkt für komplexe und innovative Technologien genutzt. So betonte Prof. Wahlster, Direktor des DFKI und Erfinder des Begriffs „Industrie 4.0“, bei einem kürzlich durchgeführten Industrie-Workshop, dass Unternehmen, die den reinen Digitalisierungsprozess noch nicht abgeschlossen haben, bereits abgehängt seien.

Einige Aspekte der digitalen Transformation führen zu disruptiven Veränderungen mit unmittelbaren Konsequenzen für etablierte Prozesse, Geschäftsmodelle und sogar ganze Branchen. Andere führen zu einem langsamen Paradigmenwechsel, zum Beispiel hin zu datenorientierten Geschäftsmodellen und vernetzten Geräten, die auf Cloud-Computing und Cloud-Speicherlösungen basieren. Bis zu einem gewissen Grad wurden im Grunde viele der heute diskutierten Themen schon vor Jahrzehnten in ähnlicher Weise betrachtet. Zum Beispiel finden sich Konzepte aus dem Bereich der Computerintegrierten Fertigung (CIM) oder der sogenannten „Fabrik der Zukunft“ bereits in verschiedener Literatur aus den 1980er Jahren. Die heutige Digitalisierung unterscheidet sich jedoch deutlich von diesen Konzepten und ihrer Realisierung. Insbesondere das Konzept von CIM, das auf Fabriken abzielt, die ausschließlich von Robotern und Computern verwaltet und betrieben werden, unterscheidet sich von den heutigen Zielen. Heute geht es nicht darum, den Menschen vom Herstellungsprozess zu entfernen, sondern ihn kollaborativ zu unterstützen und die Herstellung individualisierter und intelligenter Produkte zu ermöglichen.

Ein weiterer großer Unterschied der heutigen digitalen Transformation ist die Verfügbarkeit kostengünstiger vielseitiger Sensoren und Aktuatoren, flexibler Computergeräte und Computernetzwerk- und Kommunikationslösungen. Ein Beispiel dafür, wie die Verfügbarkeit von Technologien bestehende Ideen zu konkreten Lösungen macht, ist das Gebiet des maschinellen Lernens auf der Grundlage künstlicher neuronaler Netze: Die zugrundeliegende Theorie ist ziemlich alt, konnte aber aufgrund der mangelnden Rechenleistung, die für eine effiziente Umsetzung in großem Maßstab notwendig ist, nicht realisiert werden. Heutzutage ist Computerspeicher vergleichsweise billig, spezielle Hardware für umfangreiches paralleles Rechnen ist sogar auf Smartphones verfügbar und aufgrund der großen Anzahl von Informationsquellen und deren Verknüpfung sind große Datenmengen verfügbar. Mit diesen Technologien sind neue Inkarnationen neuronaler Netze und maschinelles Lernen wie „Deep Learning“ möglich geworden und revolutionieren etablierte Ansätze. Beispiele dafür sind intelligente Chat-Bots für den Kundensupport, Betrugserkennung für Kreditkarten und Computernetzwerke oder vorausschauende Wartung in der Fertigung. Darüber hinaus wären mehrere Neuentwicklungen ohne digitale Technologien nicht möglich. Ein gutes Beispiel ist das autonome Fahren: Die Kombination aus verbesserter und neuer Messtechnik einerseits und effizienten maschinellen Lernmethoden andererseits ermöglichen Echtzeit-Entscheidungen auf der Grundlage komplexer Sensorfusions- und Klassifikationsmethoden. Und der nächste große Schritt in der Digitalisierung kommt bereits auf uns zu und wird sehr wahrscheinlich auf Quantentechnologien, 5G-Kommunikationssystemen und dem exponentiellen Wachstum von physikalischen Geräten im „Internet der Dinge“ (IoT) basieren.

Voraussetzung für die Akzeptanz und nachhaltige Umsetzung aller oben genannten innovativen Technologien ist das ausreichende Vertrauen in ihre Sicherheit und Zuverlässigkeit. Dies ist eine

¹ Dr. Sascha Eichstädt, Arbeitsgruppe „Koordination Digitalisierung“, E-Mail: sascha.eichstaedt@ptb.de

herausfordernde Aufgabe und benötigt umfangreiche Forschung und Entwicklung in Messtechnik, Datenanalyse und Informationssicherheit. Insbesondere Metrologieinstitute bilden den Anker in der Schaffung von Vertrauen in Messergebnisse und sind dementsprechend aufgefordert diese Probleme anzugehen. Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) stellt sich den Herausforderungen der Digitalisierung und wird eine nachhaltige digitale Transformation der Metrologie vorantreiben, um sie zu einer Innovationsquelle in der Digitalisierung von Industrie und Gesellschaft etablieren. Die Entwicklungsbereiche der PTB in der Digitalisierung beinhalten unter anderem: Referenzarchitekturen für das gesetzliche Messwesen; der digitale Kalibrierschein; Metrologie für 5G-Technologien; Unsicherheiten bei großen Datenmengen und beim maschinellen Lernen; Sensornetzwerkmetrologie; Messtechnik für Simulationen und virtuelle Messungen. Intern basieren diese Entwicklungen auf einer umfassenden Digitalisierung zu effizienten digitalen Dokumenten- und Datenmanagementsystemen, digitalen Kundenplattformen, Forschungsdatenmanagementprozessen und werden durch neue interdisziplinäre Forschungsteams unterstützt.

In dieser Ausgabe der PTB-Mitteilungen wird der aktuelle Digitalisierungsstrategiebericht der PTB in deutscher und englischer Übersetzungen präsentiert. Sie werden begleitet von Artikeln von PTB-Wissenschaftlern, die spezifische Forschungsgebiete in den neuen Schwerpunktbereichen vorstellen.

Ich hoffe, Ihnen gefällt diese Ausgabe mit einer Übersicht der PTB-Aktivitäten im Bereich der Digitalisierung und würde mich sehr über Ihr Feedback zum Thema digitale Transformation und die Rolle der Metrologieinstitute darin freuen.

Mit freundlichen Grüßen

Sascha Eichstädt

Arbeitsgruppe
„Koordination Digitalisierung“

Foreword

Sascha Eichstädt¹

Digitalization is a transformational process affecting all aspects of industry, the economy and society at an ever-increasing pace. The basic concept of digital transformation differs from the more technical term of digitization in that it does not stop at the translation of analogue values into digital entities. Instead it takes digital entities as a starting point for complex and innovative technologies. Consequently, Prof. Wahlster, Director of the German Research Center for Artificial Intelligence and inventor of the term “Industrie 4.0”, emphasized, at a recent industry workshop, that companies that have not yet completed the digitalization process have already been left behind.

Some aspects of digital transformation are causing disruptive changes with immediate consequences for established processes, business models and even whole branches of industry. Others are causing a slow paradigm shift, for example, towards data-centric business models and interconnected devices based on cloud computing and storage solutions. To some extent, many of the topics discussed today were already considered in similar ways decades ago. For instance, concepts relating to computer-integrated manufacturing (CIM) or the so-called “Factory of the Future” (FoF) can be found in various papers from the 1980s. However, digitalization as considered today differs from these concepts and their realization significantly. In particular, the concept of CIM, which aimed at factories managed and operated by robots and computers alone, differs from today’s goals. Today the aim is not to remove humans from the manufacturing process, but to assist them in a collaborative way, enabling the production of more individualized and smart products.

Another huge difference in the way digital transformation is happening now is the availability of inexpensive versatile sensors and actuators, flexible computing devices and computer network and communication solutions. One example of how the availability of technology empowers existing ideas to become actual solutions is the field

of machine learning based on artificial neural networks: The underlying theory is quite old, but could not be leveraged, because of the computing power required for an efficient implementation at scale. Today, computer memory is rather cheap, specialized hardware for extensive parallel computing is available even on smartphones and large amounts of data are available due to the huge number of information sources and their interconnections. With these technologies, new incarnations of neural networks and machine learning, like “deep learning”, have become possible and are revolutionizing established approaches. Examples are intelligent chatbots for customer support, fraud detection for credit cards and predictive maintenance for manufacturing. In addition, several new developments would not be possible without new developments in digital technologies. A very good example is autonomous driving: The combination of improved and new measurement technology on the one hand and efficient machine learning methods on the other hand enable realtime decision-making based on complex sensor fusion and classification methods. And the next huge step in digitalization is waiting just around the corner and will very likely be based on quantum technologies, 5G communication systems and the exponential growth of physical devices in the “Internet of Things” (IoT).

The prerequisite for the acceptance and sustainable implementation of all the above innovative technologies is sufficient trust in their security and reliability. This is a challenging task and requires extensive research and development in measurement technology, data science and information security. In particular, metrology institutes, as the foundation of trust in measurement results and confidence in measurement-based decision making, are requested to address these issues. The Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) is taking up the challenges of digitalization and will advance a sustainable digital transformation of metrology to establish it as a source of

¹ Dr. Sascha Eichstädt,
Working Group
“Coordination
Digitalization”,
e-mail:
sascha.eichstaedt@
ptb.de

innovation in the digitalization of industry and society. PTB's development areas in digitalization contain, but are by far not limited to: reference architectures for legal metrology; a digital calibration certificate standard; metrology for 5G technologies; uncertainties in large-scale data analysis and machine learning; sensor network metrology; metrology for simulations and virtual measurements. Internally, these developments are based on comprehensive digitalization leading to efficient digital document and data management systems, digital customer platforms as well as research data management processes and they will be supported by new interdisciplinary research teams.

In this issue of the "PTB-Mitteilungen", the current digitalization strategy report of PTB is presented in German with an English translation. It is accompanied by articles by PTB scientists presenting in more detail specific research areas in the field of digital transformation.

I hope you enjoy reading this publication and I would be very pleased to learn about your thoughts and ideas regarding digitalization and the future role of metrology.

Sincerely yours,

Dr. Sascha Eichstädt

PTB Working Group
"Coordination Digitalization"

Inhalt

PTB-Digitalisierungsstrategie

- Executive Summary 13
- Einleitung 15
- Herausforderungen für die PTB als Grundpfeiler der Qualitätsinfrastruktur
und des Gesetzlichen Messwesens 19
- Themenfelder der Digitalisierung: Neue Aufgaben der PTB 23
 - Gesetzliches Messwesen* 24
 - Qualitätsinfrastruktur* 26
 - Metrologie in der Analyse großer Datenmengen* 29
 - Metrologie der Kommunikationssysteme für die Digitalisierung* 31
 - Metrologie für Simulationen und virtuelle Messgeräte* 33
 - Technologische Infrastruktur* 34
- Literaturverzeichnis 37

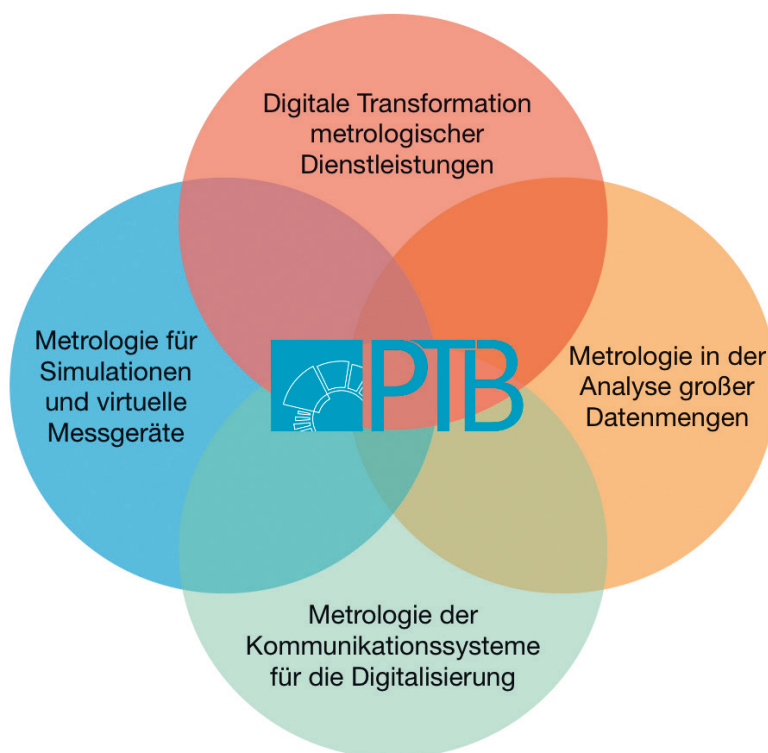
PTB-Digitalisierungsstrategie

Editor Sascha Eichstädt¹

„Im Zuge der wirtschaftlichen Digitalisierung (virtualisierte Nutzung von Ressourcen, Industrie 4.0, Internet der Dinge etc.) sollte die PTB eine führende Rolle in der Metrologie für Internet- und Digitalisierungsmessgrößen übernehmen, vor allem in den Bereichen Messwesen, Norm- und Kalibrierungswesen und Referenzgrößen in der Informationstechnik.“

Bericht des Wissenschaftsrates, 2017

¹ Dr. Sascha Eichstädt, Arbeitsgruppe „Koordination Digitalisierung“, E-Mail: sascha.eichstaedt@ptb.de



„Wir wollen die Qualitätsinfrastruktur (Normung, Akkreditierung und Konformitätsbewertung, Messwesen, technische Produktsicherheit und Marktüberwachung) weiter ausbauen, denn diese ist integraler Bestandteil des technologischen Aufschwungs in Deutschland, sie ist der Markenkern von „Made in Germany“. Hierzu werden die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) und die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) weiter gestärkt, um sich bei ihren wissenschaftlich-technischen Dienstleistungen im globalen Wettbewerb behaupten zu können.“

Innovationspolitische Eckpunkte, BMWi 2017

Executive Summary

Innovation und Vertrauen in eine leistungsfähige Qualitätsinfrastruktur sind der Kern einer stabilen und erfolgreichen Wirtschaft und Gesellschaft. Grundpfeiler einer leistungsfähigen Qualitätsinfrastruktur ist die Fähigkeit, durch hochgenaue Messungen valide Daten zu erzielen: die Metrologie. Wirtschaft und Gesellschaft des 21. Jahrhunderts befinden sich in einem tiefgreifenden Prozess der digitalen Erweiterung und Transformation: Jetzt werden die Weichen gestellt, um den Kern des Erfolgs im Digitalen Raum zu verankern – Grundstein für die Entwicklung von Wirtschaft und Gesellschaft im Digitalen Zeitalter. Die Digitalisierung ist dabei ein seit vielen Jahren andauernder Prozess, in welchem sich insbesondere durch die dramatische Entwicklung von Rechner- und Speicherkapazitäten sowie der Geschwindigkeit des Datenaustausches und der kostengünstigen Verfügbarkeit vielfältiger und flexibel einsetzbarer Sensoren in rasanter Geschwindigkeit vollständig neue Möglichkeiten der Vernetzung von Objekten und der Verwendung der gespeicherten Daten und Informationen eröffnen.

Die Rolle der Metrologie für die Digitalisierung der Wirtschaft und Gesellschaft

Messwerte, Daten, Algorithmen, mathematische und statistische Verfahren sowie Kommunikations- und Sicherheitsarchitekturen bilden die Grundlage der digitalen Erweiterung und Transformation. Somit ist die digitale Ertüchtigung der Qualitätsinfrastruktur (QI) – dem Dreiklang aus Metrologie, Normung und Akkreditierung – sowie des gesetzlichen Messwesens mit Konformitätsbewertung, Eichwesen und Marktüberwachung zentrale Voraussetzung für das Gelingen der digitalen Transformation zu einer vernetzten Wirtschaft, Industrie und Gesellschaft. Der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) als dem nationalen Metrologieinstitut obliegt dabei eine Schlüsselrolle mit vielfältigen Zuständigkeiten und Kom-

petenzen. Sie umfassen neben der Entwicklung und Validierung höchstgenauer Messverfahren, Algorithmen und Datenanalysemethoden unter anderem auch die Validierung von Messdaten durch Rückführung auf das internationale Einheitensystem (SI). Dies bildet unter anderem die Grundlage der Akkreditierung, der gesetzlichen Metrologie im Rahmen des Mess- und Eichgesetzes (MessEG) und der Mess- und Eichverordnung (MessEV), bei der Mitentwicklung nationaler und internationaler Normen und Standards sowie bei der Beratung der Eichbehörden für die Marktüberwachung. Die PTB ist somit ein Eckpfeiler der nationalen Qualitätsinfrastruktur und des gesetzlichen Messwesens und hat sich zum Ziel gesetzt, für Industrie und Gesellschaft als verlässlicher Partner in der digitalen Transformation zu agieren. Im Mittelpunkt stehen dabei insbesondere die von der PTB im gesetzlich geregelten Bereich und der QI angebotenen metrologischen Dienstleistungen sowie die häufig mittelständisch organisierte deutsche Sensor- und Messgeräteindustrie.

International wird die Metrologie für die Digitalisierung durch Forschungsprogramme und den Aufbau neuer Kompetenzgruppen intensiv vorangetrieben. So erarbeiten mehrere große Gruppen am NIST in den USA seit vielen Jahren mit staatlichen Einrichtungen und privatwirtschaftlichen Partnern international hoch angesehene regulatorische und administrative Grundlagen für die Bereiche Cloud-Computing, Big Data, IT-Security und Machine Learning, sowie die metrologischen Grundlagen für den Ausbau hochleistungsfähiger Kommunikationswege (5G). Auch das NPL in Großbritannien baut den Bereich Data Science, 5G-Netze und digitalisierungsnahe Forschung massiv aus. Ähnliche Aktivitäten sind zurzeit weltweit zu beobachten. Die PTB wird entsprechend ihre Kompetenzen weiter ausbauen, um auch in der digitalen Transformation und Erweiterung ihrer Rolle als eines der weltweit führenden Metrologieinstitute gerecht zu werden.

Identifizierte neue Schwerpunktthemen

In einer umfassenden Studie beruhend auf intensiver interner Analyse der Kernkompetenzen der PTB, auf bereits direkt geäußerten Kundenanforderungen sowie auf den Ergebnissen eines PTB-Delegationsbesuchs am NIST und mehreren Expertendiskussionen wurden grundlegende neue Aufgaben für die PTB zur Unterstützung der digitalen Transformation identifiziert und die folgenden neuen Schwerpunktbereiche abgeleitet:

A. *Digitale Transformation metrologischer Dienstleistungen*

Im Zentrum steht hier die digitale Ertüchtigung der Qualitätsinfrastruktur und des gesetzlichen Messwesens, unter anderem durch die Entwicklung von Referenzarchitekturen, validierter statistischer Verfahren für “predictive maintenance”, einer Infrastruktur für digitale Kalibrierscheine und nicht zuletzt dem Aufbau einer “Metrology Cloud” als digitale Qualitätsinfrastruktur zur Harmonisierung und Fortentwicklung der Konformitätsbewertung und Marktüberwachung.

B. *Metrologie in der Analyse großer Datenmengen*

Ziel ist die Entwicklung metrologischer Analysemethoden für große Datenmengen und die Evaluierung von Methoden des maschinellen Lernens für Big Data mit dem Fokus auf existierende und zunehmend relevante metrologische Anwendungen für die Industrie, in denen große Datenmengen verarbeitet und hochdimensionale Informationen abgeleitet werden müssen, z. B. bei bildgebenden Verfahren und in der Photonik.

C. *Metrologie der Kommunikationssysteme für die Digitalisierung*

Dieser Themenschwerpunkt adressiert die Sicherung und metrologische Validierung einer verlässlichen, abgesicherten und leistungsfähigen Kommunikation in komplexen Szenarien. Er umfasst die Rückführung komplexer Hochfrequenzmessgrößen für 5G-Netze, nichtlineare und statistische Messgrößen in der Hochfrequenz, abgeleitete Messgrößen in digitalen Kommunikationssystemen und komplexe Antennensysteme.

D. *Metrologie für Simulationen und virtuelle Messgeräte*

Durch die Entwicklung von Analysemethoden und Zulassungsverfahren für vernetzte und virtualisierte Messsysteme werden die Simulation komplexer Messsysteme (z. B. optische

Formmesstechnik oder Koordinatenmesstechnik) für die Planung und Analyse von Experimenten, Verfahren und Normale für die automatisierte Fertigungssteuerung und virtuelle Messprozesse zur automatischen Messdatenauswertung aktiv unterstützt.

Umsetzungsstrategie

Die großen Eckpfeiler für die PTB als Unterstützer in der digitalen Transformation der Wirtschaft und Gesellschaft sind dabei zum einen die disziplinübergreifenden Querschnittsvorhaben:

Metrology Cloud – Etablierung einer vertrauenswürdigen Kernplattform für eine digitale Qualitätsinfrastruktur durch die Ankopplung bestehender Dateninfrastrukturen und Datenbanken und einem differenzierten Zugriff aller Partner für eine digitale Ertüchtigung des gesetzlichen Messwesens.

Digitaler Kalibrierschein – Entwicklung einer sicheren und standardisierten digitalen Informationsstruktur für den universellen Einsatz in Kalibrierung, Akkreditierung und Messung und einer digitalen Ertüchtigung der gesamten Kalibrierhierarchie in der Qualitätsinfrastruktur.

Virtuelle Experimente und Mathematikgestützte Metrologie – Entwicklung einer disziplinübergreifenden virtuellen Kompetenzgruppe für die metrologische Unterstützung des Paradigmenwechsels zur Verwendung von Simulationen und Datenanalyse als essenziellen Bestandteil von Messverfahren.

Darüber hinaus sollen in den entsprechenden Fachbereichen unter anderem die gezielte metrologische Forschung für moderne Hochfrequenznetze (5G), die Erweiterung der Qualitätsinfrastruktur auf die Online-Überwachung sowie eine metrologische Unterstützung der digitalisierten Präzisionsfertigung nachhaltig unterstützt werden.

Einleitung

Grundsätzlich versteht man unter dem Begriff der Digitalisierung die Transformation analoger Größen in diskrete Werte zur elektronischen Speicherung und Verarbeitung [1]. Der Begriff wird derzeit jedoch auch ganz allgemein als Umstellung der gesamten Gesellschaft auf die Verwendung von Digitaltechnologien [2] und die zunehmende Vernetzung von Daten und Maschinen in den Geschäftsprozessen mithilfe digitaler Schnittstellen verwendet. In der Vernetzung in lokalen Verbunden bis hin zu globalen Netzwerken äußert sich damit auch die neue Qualität des Digitalisierungsprozesses. Daten werden zwischen Maschinen und Menschen flexibel und automatisiert ausgetauscht, ausgewertet und visualisiert. Das eröffnet neue Möglichkeiten der Kommunikation, neue Geschäftsfelder für bestehende Unternehmen und hat zu gänzlich neuen Industrie- und Forschungszweigen geführt. So meinen einer BITKOM-Studie [3] zufolge inzwischen 65 % der deutschen Unternehmen, dass die Digitalisierung ihre bestehenden Geschäftsmodelle verändern wird.

„Perhaps the most significant business disruptions will come from a combination of the connected sensors, devices and objects (Internet of Things), coupled with new ways to analyze, action and monetize the resulting data streams.“

atos Studie „Journey 2020“

Auf der anderen Seite stellen sich jedoch auch viele neue Herausforderungen, da sich bestehende Konzepte, Standards und Handlungsweisen oftmals nicht auf die digitale Welt und vernetzte Systeme übertragen lassen [4]. So werden im Bereich des **Messwesens** Sensorhersteller zunehmend gefordert, Messfähigkeiten anstelle reiner Messgeräte anzubieten. Als Konsequenz wird Sensorik verstärkt mit zusätzlicher Intelligenz und eingebauter Datenverarbeitung entwickelt [5]. Dadurch eröffnen sich jedoch für die rückführbare Kalibrierung große Herausforderungen, die mit einem reinen Ansatz des genauen Messens allein nicht mehr handhabbar sind.

Die Menge der Daten, die durch die Digitalisierung verarbeitet werden muss, steigt rasant an und kann nur durch geeignete mathematische und statistische Werkzeuge gewinnbringend nutzbar gemacht werden [6, 7, 8]. In einem ersten Schritt gehen Firmen oftmals den Weg, die Datenflut geeignet zu visualisieren. Dazu wird zum Beispiel basierend auf Sensordaten in einem „digitalen Zwilling“ einer Anlage dargestellt, welche Vorgänge sich dort gerade abspielen. Einen großen Schritt weiter gehen Methoden des „**predictive maintenance**“ [9], bei welchen mittels statistischer Analysen aus den Daten Schlussfolgerungen bzgl. der zu erwartenden Zuverlässigkeit des Systems gezogen werden. Somit können starre Prüfintervalle und damit unnötige Stopps der Anlage vermieden werden. Durch solche und andere Methoden der intelligenten und automatisierten Echtzeit-Datenanalyse kann eine signifikante Effizienzsteigerung auch in bereits voll automatisierten Anlagen erreicht werden [10]. Dabei werden in der Regel modellfreie Verfahren für die Datenanalyse verwendet, die auf großen Datenmengen „trainiert“ werden [11], was für die quantitative Bestimmung der Qualität der Ergebnisse neue Anforderungen ergibt. Gleichzeitig benötigen auch modellbasierte Verfahren verstärkt neue Ansätze, um für die rasant steigenden Datenmengen zum Beispiel aus bildgebenden Verfahren etablierte Konzepte der **Datenanalyse** umsetzbar zu machen. In der Metrologie zeigt sich diese Herausforderung zunehmend in der Notwendigkeit, Messunsicherheiten für hochdimensionale Größen zu bestimmen und weiterzugeben. Durch die Vernetzung verschiedener Datenquellen und verteilte Messsysteme werden diese Anforderungen an die Datenanalyse in der Metrologie weiterhin steigen.

„Der Begriff Datenqualität bezeichnet die Güte und Verlässlichkeit von Datenobjekten selbst. Wenn immer möglich sollte die Unsicherheit in einem Datum geeignet quantifiziert werden.“

Rat für Informationsinfrastruktur 2016

Darüber hinaus spielen, wie bei allen digitalisierten Anwendungen, die **IT-Schutzziele Integrität, Vertraulichkeit und Verfügbarkeit** in unterschiedlichen Ausprägungen eine grundlegende Rolle [12, 13]. Dabei variieren die Schutzbedarfe in Abhängigkeit von den konkreten Anforderungen in der Anwendung. Auch spielt die Integrität von Messmitteln, also der Schutz vor unerlaubtem Zugriff auf Messmittel und ihrer Kalibrierung eine wichtige Rolle [14]. Die IT-Schutzziele sind insbesondere im gesetzlich regulierten Bereich – dem gesetzlichen Messwesen – von grundlegender Bedeutung [4]. Dort ist die Sicherstellung von Integrität, Vertraulichkeit und Verfügbarkeit die unbedingte Voraussetzung für die Akzeptanz moderner Informations- und Telekommunikationstechniken (IKTen). Andererseits würde die Forderung nach höchsten BSI-Standards die Hersteller vor unnötig hohe Anforderungen stellen und damit ein Hemmnis für Innovation und Entwicklung darstellen. Hier kann und muss die PTB eine Schlüsselrolle spielen bei der Erarbeitung geeigneter, rechtskonformer Lösungen für die Hersteller, Anwender und die Marktaufsicht.

So wie technische Lösungen aus dem nicht-regulierten Bereich mehr und mehr den Einsatz im gesetzlichen Messwesen finden werden (z. B. Cloud-Computing oder Fernwartung), werden viele der für den regulierten Bereich benötigten Lösungen zukünftig auch im nicht regulierten Bereich einsetzbar sein, da hier ähnliche Bedarfe durch Nutzerforderungen zu erwarten sein werden. Gleichzeitig werden Geräte mit unnötig hohen Sicherheitsvorkehrungen eine Marktdurchdringung nahezu unmöglich machen. Ein entsprechendes Bild lässt sich für das gesetzliche Messwesen zeichnen, wo Hersteller zunehmend moderne IKT einsetzen wollen. Die nötige **Konformitätsbewertung** sieht strenge Regeln für die Datenkommunikation und Datenverarbeitung vor, während gleichzeitig für die Marktaufsicht eine technologisch einfache Überprüfbarkeit gewährleistet sein muss [15]. Diesen Balance-Akt gilt es in Zukunft zu meistern, um das gesetzliche Messwesen digital zu ertüchtigen

„Das BMWi erwartet sich von Industrie 4.0 Mehrwerte von über 30 Mrd. Euro pro Jahr. 80 % der Industrieunternehmen sagen, dass sie bis 2020 ihre komplette Wertschöpfungskette digitalisieren, was laut der Studie Industrie 4.0 von PWC mit Investitionen von 40 Mrd. Euro pro Jahr verbunden ist.“

BMWi & BMAS
„Arbeiten in der digitalen Welt“

Der größte Treiber für die digitale Transformation ist derzeit die Industrie, was sich in Konzepten wie der „Industrie 4.0“, dem „Industrial Internet of Things“ oder „Cyber Physical Systems“ widerspiegelt. So ermittelte eine aktuelle Studie des

VDMA [16], dass im Maschinen- und Anlagenbau bereits von einem Viertel der Unternehmen neuartige digitale Technologien, wie zum Beispiel Cloud-Dienste, angeboten werden. Der größte Nutzen wird von diesen Unternehmen im weiteren Ausbau der Automatisierung und dadurch die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit deutscher Industrie gesehen. Die dafür notwendigen Kompetenzen liegen nicht mehr in der reinen Messtechnik, sondern eher in der Softwareentwicklung und der Analyse komplexer Daten. So wird die Anlagensteuerung und Überwachung zunehmend durch sogenannte „Apps“ realisiert, welche auch herstellerfremde Datenquellen mit einbeziehen können müssen. Das erfordert eine bereichsübergreifende Implementierung und Vernetzung, welche nur auf geeigneten und akzeptierten Normen aufbauen kann. Allgemein ist die Tendenz zu beobachten, dass Firmen eher auf Kollaboration mit anderen Industriepartnern für die Entwicklung bilateraler Vereinbarungen setzen, als auf klassische Wege der Normung und Standardisierung. Als ein Grund dafür wird die Notwendigkeit des schnellen Handelns angeführt, welche sich aus dem internationalen Marktdruck ergibt. So empfiehlt die VDMA-Studie, dass Unternehmen nicht auf die Entwicklung umfassender Standards warten, sondern stattdessen zügig selbst erste Lösungen anbieten sollten [16]. Dieser Entwicklung gilt es mit schnellen, konzentrierten, handhabbaren und flexiblen Standardisierungsvorhaben entgegenzutreten.

Neben dem Maschinenbau und der Informationstechnologie ist die Photonik eine wichtige Schlüsseltechnologie für den Innovationsstandort Deutschland und trug bereits 2011 mit 66 Mrd. Euro Produktionsumsatz wesentlich zur Wirtschaftsleistung der EU bei [17]. Der anstehende Wandel hin zu integrierten photonischen (Mikro-) Systemen sowie die Verknüpfung mit schnellen und mächtigen Werkzeugen der elektronischen Bildverarbeitung machen die Photonik nun in immer mehr Märkten auch zur strategischen Technik in Produkten und Prozessen, von der Steuerung (z. B. Gestensteuerung, Mikrodisplays) über die Datenerfassung (Sensorik) und Datenverarbeitung (computational imaging) bis zur Produktion (3D-Druck / additive Fertigung, Online-Qualitätsmessung, Laserbearbeitung) [18]. Die Photonik ist damit Treiber und Nutzer der Digitalisierung. Insbesondere virtuelle Experimente und Simulationen sind in der Photonik ein Basiswerkzeug für die Planung, Optimierung und Analyse. Allerdings mangelt es vielfach an verlässlichen Standards und metrologischer Rückführung [17, 18]. Basierend auf ihren bestehenden sehr guten Kompetenzen und einer gezielten Ausweitung der Forschungsaktivitäten, kann die PTB hier zukünftig eine Schlüsselrolle einnehmen.

Auch der gesamte Bereich der Gesundheit ist von den Umbrüchen durch die digitale Transformation massiv beeinflusst. So werden in der Biotechnologie innovative Digitalisierungskonzepte helfen, Wert- und Wirkstoffe in neuartigen Prozess-, Produktions- und Kooperationsverfahren herzustellen. Zur Realisierung sind branchen- und disziplinübergreifende Kooperationen mit Partnern sowohl im industriellen Raum wie auch in der Forschung nötig. Beispiele für einen solchen Verbund können übergreifende Netzwerke in der Bioökonomie mit gemeinsamen Zielen und gemeinsamer informationstechnischer Infrastruktur sein, mit dem Ziel, innovative Plattformen für die ressourcen- und energieeffiziente Erforschung, Entwicklung und Implementierung biobasierter Produkte und Prozesse zu entwickeln. Hier ist die PTB bereits in engem Kontakt mit großen deutschen Pharmaunternehmen.

Herausforderungen für die PTB als Grundpfeiler der Qualitätsinfrastruktur und des Gesetzlichen Messwesens

Die Herausforderung der PTB in der Digitalisierung der Wirtschaft und Gesellschaft leitet sich ab aus ihrer gesetzlich geregelten besonderen Stellung in der **Qualitätsinfrastruktur** (mit dem Dreiklang aus Metrologie, Normung und Akkreditierung) sowie dem **gesetzlichen Messwesen** (mit der Konformitätsbewertung und Marktüberwachung). Die PTB kann und muss als starker Partner und Vermittler zwischen Industrie und Normung auftreten, aufbauend auf entsprechender Kompetenz in den etablierten Bereichen der Metrologie, sowie den neuen Bereichen der IT-, Kommunikations- und Datenanalyse-Landschaft, um Qualitätsinfrastruktur und gesetzliches Messwesen als Innovationsförderer und Garant für die Nachhaltigkeit deutscher Qualität zu unterstützen, voranzutreiben und möglichst schnell zu etablieren. Der Bericht des Wissenschaftsrates empfiehlt entsprechend, dass die PTB

„eine führende Rolle in der Metrologie für Internet- und Digitalisierungsmessgrößen übernehmen [sollte], vor allem in den Bereichen Messwesen, Norm- und Kalibrierungswesen und Referenzgrößen in der Informationstechnik.“

WR2017

Die deutsche **Qualitätsinfrastruktur** ist dabei ein effektives, oft global akzeptiertes Verkaufsargument für Unternehmen und als Modell für eine nachhaltige Rückführungskette inzwischen auch international hoch angesehen. Die in technischen und teilweise in medizinischen Bereichen auf metrologischer Basis beruhende Standardisierung und Normung legen den Grundstein für den oft internationalen Marktzugang mittelständischer Unternehmen und die Interoperabilität von Geschäftsmodellen. Das Rückgrat der Qualitätsinfrastruktur und damit eine Kernaufgabe der PTB bilden Rückführung (Metrologie), Standardisierung und Akkreditierung. Durch eine enge Verzahnung mit den DAkkS-Laboratorien, für welche die PTB Fachbegutachter zur Verfü-

gung stellt und ca. 3500 Kalibrierungen pro Jahr durchführt, der Mitarbeit in mehr als 400 Standardisierungsgremien und dem PTB-Präsidenten als Vizepräsidenten des DIN, der Rolle der PTB für die Konformitätsbewertungsstellen (KBS) als Vorsitz im Regelermittlungsausschuss und der Leitung des Ausschusses der KBS, dem Vorsitz der PTB im deutschen Kalibrierdienst (DKD) sowie der bei der PTB bestehenden Vollversammlung des Mess- und Eichwesens zum Informations- und Erfahrungsaustausch und zusammen mit vielen anderen Partnern sichert die PTB dabei die Stellung der deutschen Wirtschaft durch verlässliche und hochpräzise Messfähigkeiten.

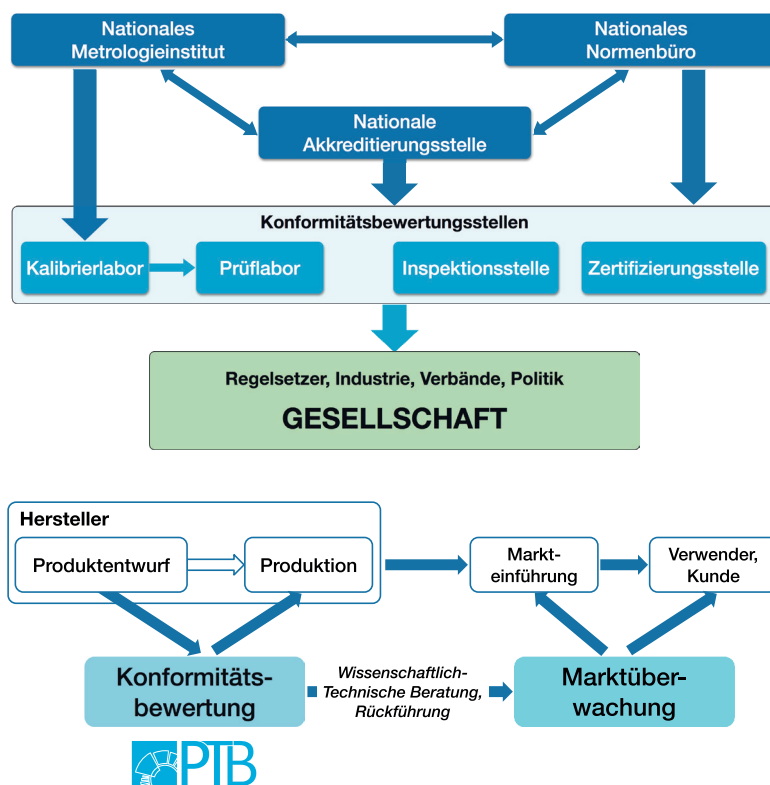


Abbildung 1: Die Rolle der PTB in der deutschen Qualitätsinfrastruktur (oben) und die Rolle der PTB im gesetzlichen Messwesen und der Marktüberwachung (unten)

Die digitale Transformation der Produkte und die Verwendung digitaler Prozesse in der **Konformitätsbewertung** führen derzeit in dramatischer Weise zu neuen Herausforderungen, z. B. für den Kalibriervorgang, und verlangen nach einer digitalen Transformation der gesamten Rückführungskette. So erfordert beispielsweise der Einsatz intelligenter Sensorik als Produkt in der Qualitätsinfrastruktur eine geeignete Rückführung, welche die physischen Eigenschaften des Aufnehmers ebenso berücksichtigt wie die integrierte digitale Vorverarbeitung der Messdaten. Gleichzeitig erfordert eine digitale Transformation der administrativen Prozesse in der Rückführungskette, Akkreditierung und Konformitätsbewertung eine geeignete Standardisierung sowie eine zentrale vertrauenswürdige Instanz für die Zertifizierung digitaler Kalibriernachweise.

„Referenz-Messgrößen werden für die digitalisierte Wirtschaft immer wichtiger, die Nachfrage nach Kalibrierungen von digitalen Systemen wird angesichts der dynamischen Entwicklung Cloud-basierter Dienste zunehmend dringlicher. [...] Vor diesem Hintergrund werden die Aktivitäten zum Aufbau der Metrologie für die Digitalisierung mit großem Nachdruck unterstützt.“

WR2017

Das **gesetzliche Messwesen** ist, mit der Konformitätsbewertung vor dem Inverkehrbringen sowie dem Eichwesen und der Marktüberwachung in der Verwendung, der Garant für das gegenseitige Vertrauen der Kunden und Hersteller. Insbesondere im Bereich der Verbrauchsmessgeräte (Strom, Wasser, Gas, Treibstoff, u. a.) und den im Handel eingesetzten Waagen zeigt sich mit – allein in Deutschland – über 170 Millionen Messgeräten und einem jährlichen Umsatz von ca. 150 Mrd. Euro die gesellschaftliche und wirtschaftliche Bedeutung des gesetzlichen Messwesens [19]. Die rechtliche Basis bildet dabei auf europäischer Ebene die „Measuring Instruments Directive“ (MID) 2014/32/EU, welche national mit dem Mess- und Eichgesetz [20] und der Mess- und Eichverordnung [21] umgesetzt worden ist. Der Bereich der Konformitätsbewertung (und Standardisierung) profitiert dabei auf europäischer Ebene zum einen von der etablierten Vernetzung in verschiedenen Gremien und Verbänden. Zum anderen hat der „**New Approach**“ der EU im Bereich der Konformitätsbewertung die Grundlage für die EU-weite Anerkennung von Konformitätsbescheinigungen und die Beschränkung auf grundlegende Anforderungen gelegt [22]. Damit verbunden ist eine grundsätzliche Offenheit gegenüber neuen Technologien sowie der Stärkung der europäischen Standardisierung und des europäi-

schen Binnenmarktes. Die zunehmend komplexen Informations- und Kommunikationstechniken in den Messgeräten führt indes im gesetzlich geregelten Bereich inzwischen zu einem rasant steigenden Aufwand für die Konformitätsbewertung und enormen Anforderungen für das Eichwesen und die Marktaufsicht. Infolgedessen besteht zunehmend die Gefahr, dass diese von den Herstellern vermehrt als Innovationshemmnis gesehen werden. Hier werden geeignete Referenzarchitekturen für eine Beschleunigung der Konformitätsbewertung und die Unterstützung des Eichwesens und der Marktaufsicht benötigt. Darüber hinaus ist die Etablierung digitaler, Cloud-basierter Angebote mit einer zentralen Instanz als vertrauenswürdigen Kern für die digitale Transformation der Prozesse im gesetzlichen Messwesen unbedingt notwendig.

„Die PTB wird nachdrücklich in ihrem Bestreben unterstützt, den Aufbau einer Referenzarchitektur für das sichere Cloud-Computing zu initiieren und in zentraler Funktion zu koordinieren. [...] Die Cloud-Metrologie sollte [...] der Umsetzung digitaler Konzepte zur Koordinierung, Konzentration, Vereinfachung, Harmonisierung und Qualitätssicherung von metrologischen Dienstleistungen in Europa für alle Beteiligten dienen.“

WR2017

An Unternehmen stellt die rasant fortschreitende digitale Transformation eine Vielzahl neuer Anforderungen und wird von diesen überwiegend als die größte Herausforderung für den Erhalt der eigenen Wettbewerbsfähigkeit gesehen. Aus den in der „Plattform Industrie 4.0“ [23] genannten Beispielen erfolgreicher digitaler Transformation wird ersichtlich, dass die Anforderungen für Unternehmen in der Umsetzung einer digitalen Transformation dabei überwiegend in den folgenden Bereichen liegen:

- Kompetenzen im Bereich IT und Software;
- Modellierung und virtueller Messprozess, bzw. „Digitaler Zwilling“;
- Echtzeit-Datenspeicherung und Cloud-Dienste;
- Autonome Systeme;
- Entwicklung und Einbindung von Apps;
- Verknüpfung von virtueller und physischer Welt (CPS).

Diese Technologien sind inzwischen der sogenannten Hype-Phase entwachsen und im indus-

triellen Alltag angekommen [16]. Bereits jetzt sind die für absehbar disruptive Entwicklungen [24] benötigten Technologien teilweise in großer Bandbreite verfügbar und werden der Studie [24] nach in den kommenden 2 bis 3 Jahren zu weitergehenden Veränderungen in der Geschäftswelt und Industrie führen. Die Unternehmen stellen sich in großem Maße und mit beachtlicher Geschwindigkeit darauf ein, wie beispielsweise für den Maschinen- und Anlagenbau nach Aussage der VDMA IMPULS-Studie [16]. Demgegenüber ist der momentane Stand der digitalen Transformation

in der PTB und damit auch von weiten Teilen der QI sowie den Eichbehörden der Länder deutlich weniger gut entwickelt. Wenn auf diesen Missstand nicht umfassend, wirkungsvoll und zügig reagiert wird, entsteht daraus die Gefahr, dass die Qualitätsinfrastruktur insgesamt als Innovationshemmnis gesehen und seine Bedeutung verlieren wird.

Themenfelder der Digitalisierung: Neue Aufgaben der PTB

Der kontinuierliche Austausch zwischen Politik, Wirtschaft und Forschung ist eine Grundvoraussetzung für das Gelingen der digitalen Transformation, da den Herausforderungen der Digitalisierung nur mit gemeinsamen Anstrengungen begegnet werden kann. Die **Plattform Industrie 4.0** bildet dabei den Kern der nationalen Initiativen, indem sie alle Partner zusammenbringt und vernetzt [25]. Die vielfältigen Themenfelder werden dabei in Arbeitsgruppen bearbeitet und die Vernetzung durch die zentrale Leitung koordiniert. Für die PTB ist in diesem Umfeld vor allem der Bereich der Standardisierung und Normung von Bedeutung, da sie hier, nicht zuletzt durch Teilnahme in mehr als 400 Gremien, national wie international eine Schlüsselrolle einnimmt, wie der Wissenschaftsrat in seinem Bericht festgestellt hat. In der PTB-Expertendiskussion mit Vertretern der Plattform wurde diese Rolle eindeutig bestätigt und die Aufnahme der PTB in die Plattform klar befürwortet. Inzwischen ist die PTB in der Spiegelgruppe für Standardisierung vertreten und wird ihre langjährige Erfahrung und Kontakte auf diesem Gebiet einbringen. Durch gezielte Forschungsaktivitäten für die neuen Herausforderungen der Digitalisierung und einer eigenen digitalen Transformation wird die PTB ihre derzeitige Spitzenrolle in diesem Prozess wirkungsvoll fortsetzen können.

Die Bundesregierung und die Bundesministerien unterstützen die digitale Transformation mit einer Reihe von Maßnahmenpaketen und Fördermaßnahmen. So wird die identifizierte Informationslücke im Mittelstand beispielsweise durch den kontinuierlichen Ausbau von Kompetenzzentren **Mittelstand 4.0** und verschiedene Förderprogramme gezielt adressiert [26]. Eine indirekte Unterstützung dieser Vorhaben durch die PTB kann zum Beispiel durch die digitale Transformation des Kalibrierwesens oder die Zurverfügungstellung von Referenzarchitekturen realisiert werden, indem digitale Geschäftsprozesse durch entsprechende digitale Schnittstellen in der Mess-

ketten und der QI auf adäquatem Sicherheitsniveau begleitet werden.

Testzentren bieten insbesondere KMU die Möglichkeit, ohne eigenes Risiko neue Technologien zu evaluieren und mit kompetenten Partnern Lösungen zu entwickeln. Daher wird dieser Bereich durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) intensiv gefördert und durch den Verein **Labs Networks Industrie 4.0** (LNI4.0) gezielt unterstützt [27, 28]. Die PTB zeichnet sich bereits heute durch eine Vielzahl von Kooperationsprojekten mit KMU aus, bei denen Technologie und Know-how in Form gemeinsamer Projekte und Lizenzierungen transferiert werden. Mit einer gezielten Entwicklung technologischer Angebote für die Herausforderungen der digitalen Transformation kann die PTB auch in Zukunft ihre Stellung als Förderer der deutschen Industrie und Wirtschaft sicherstellen. Dabei wird eine enge Kooperation mit dem LNI4.0 angestrebt, um Synergieeffekte zu nutzen und die Sichtbarkeit der eigenen Angebote zu erhöhen. Erste Gespräche mit dem LNI4.0 wurden bereits durchgeführt. Für die PTB ist in dieser Kooperation insbesondere die Rückkopplung vom LNI4.0 zur Standardisierung über das **Standardization Council 4.0** (SC4.0) [29] und die Spiegelung in der Vielzahl von internationalen Gremien, in denen die PTB bereits vertreten ist, von großer Bedeutung, da hierüber die entwickelten Technologien eine nachhaltige Förderung der gesamten Qualitätsinfrastruktur hervorbringen. Insofern ist die Entwicklung geeigneter Testzentren an der PTB in doppelter Hinsicht ein Gewinn und Nutzen für die deutsche Wirtschaft. In einem ersten Schritt plant die PTB gemeinsam mit interessierten Partnern und der Firma Siemens den Aufbau eines Testfelds **Digitale Transformation in der Qualitätsinfrastruktur**. Darüber hinaus werden PTB-intern existierende Arbeiten identifiziert, welche zukünftig zusammen mit dem LNI4.0 als Testzentren angeboten werden können, um die digitale Transformation der deutschen Wirtschaft

gezielt zu unterstützen. Naheliegender ist beispielsweise ein weiteres Testfeld der PTB im Bereich virtueller Messgeräte, basierend auf der messaufgabenspezifischen Messunsicherheitsbestimmung für komplexe 3D-Messsysteme.

Im Bereich der Biotechnologie unterstützt das BMBF mit der Fördermaßnahme „Innovationsräume Bioökonomie“ im Rahmen der „Nationalen Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030“ die Bildung von Netzwerkprojekten mit Inhalten von Aus- und Weiterbildung bis Standardisierung. Auch auf Initiative der Industrie wird sich die PTB in einem Projektantrag „Digitalisierung der Biotechnologie“ in den Bereichen Rückführbarkeit von Messwerten, sicherem Datentransfer und Standardisierung engagieren.

Auf europäischer Ebene gibt es ebenfalls eine wachsende Zahl von Kooperationsprojekten und Förderinitiativen. Die Kooperation verschiedener europäischer Partner orientiert sich dabei an der EU-Strategie eines **Digital Single Market** [30], in der verankert ist, einen digitalen grenzenlosen Handel zu etablieren, Regeln und Standards zu entwickeln, die mit dem technologischen Fortschritt mithalten können und Maßnahmen zu ergreifen, um der europäischen Wirtschaft und Industrie die vollständige Ausnutzung der Chancen der Digitalisierung zu ermöglichen. Neben der gezielten Förderung von Forschungsprojekten, zum Beispiel im Rahmen von Horizon 2020 [31, 32], gehört dazu auch die Entwicklung einer Strategie für eine „European Open Science Cloud“ in der „European Cloud Initiative“ [33]. Während die GovData-Plattform [34] und die aktuellen Gesetzesinitiativen auf Bundesebene aktuell auf Verwaltungsdaten beschränkt sind, sollen in der „European Open Science Cloud“ explizit auch Forschungsergebnisse, frei nutzbar gemacht werden [33]. In einem ersten Schritt ist dazu geplant, für neue Forschungsprojekte aus dem Horizon-2020-Programm erhaltene Forschungsdaten offen zu legen. Da sich die PTB in einer Vielzahl europäischer Projekte im Rahmen des Horizon-2020-Programms engagiert, stellen sich durch diese Entwicklung auch große Herausforderungen an das Forschungsdatenmanagement der PTB, die zeitnah adressiert werden müssen. Diese Notwendigkeit wurde auch vom Wissenschaftsrat erkannt und er empfahl, dringend zu handeln. Erste Schritte hierzu wurden seitens der PTB bereits unternommen.

Gesetzliches Messwesen

Im Bereich des gesetzlichen Messwesens (Konformitätsbewertung, Eichwesen, Marktüberwachung) äußert sich die Digitalisierung derzeit vor allem durch die zunehmende Verbreitung sogenannter „intelligenter Messsysteme“ (z. B. Smart Meter),

zum Beispiel im Zuge der **Digitalisierung der Energiewende**, verteilter Messsysteme und Cloud-Infrastrukturen [35, 36]. Allgemein sind signifikante Anstrengungen zu unternehmen, um eine digitale Transformation des gesetzlichen Messwesens (und der Qualitätsinfrastruktur) voranzutreiben, da in vielen Bereichen die Digitalisierung der Industrie davon abhängig ist. So verzeichnen die PTB-Abteilungen mit Fachbereichen, die im gesetzlichen Messwesen mit der Prüfung physikalischer Eigenschaften beauftragt sind, eine zunehmende Zahl von Anfragen aus der Industrie zu digitalen intelligenten Sensoren, verteilten Messsystemen und Cloud-Infrastrukturen. Zurzeit wird die Integration moderner Informations- und Kommunikationstechniken in Messgeräten für regulierte Bereiche jedoch durch hohe Hürden beim Zulassungsprozess und der Konformitätsbewertung gehemmt. Hersteller sehen dadurch in der Regulierung und Zulassungspraxis zunehmend ein Innovationshemmnis und befürchten langfristige Wettbewerbsnachteile. Die PTB kann diesen Prozess durch die **Entwicklung rechtskonformer Referenzarchitekturen** unterstützen, welche akzeptable Lösungen mit angemessener Sicherheit und einfachen Verifikationsmethoden für Basistechnologien neuer Technologiefelder anbieten. Hersteller, die von der PTB angebotene Referenzarchitekturen für ihre Messgeräte verwenden, können einen zügigen Zulassungsprozess erwarten und somit Innovationen schneller auf den Markt bringen. Gleichzeitig sichern die Referenzarchitekturen die Einhaltung der notwendigen Sicherheitsstandards und die für die Marktaufsicht notwendige Prüfbarkeit. Insbesondere die Entwicklung von Architekturen für die rechtskonforme Trennung der Messgerätesoftware in einen gesetzlichen relevanten und einen freien Anteil ermöglicht den Herstellern die Entwicklung neuer innovativer Angebote, regelmäßige Software-Updates und individuelle Kundenanpassungen im freien Softwareteil, ohne den Zulassungsprozess erneut durchlaufen zu müssen.

Der Trend geht eindeutig zu Messgeräten mit verteilten, teilweise virtualisierten Komponenten und der Verwendung von **Cloud-Services**. Dies gilt auch verstärkt im gesetzlichen Messwesen. Allein die Trennung von Messwert-erfassender, verarbeitender und wertanzeigender Einheit bietet den Herstellern vielfältige Möglichkeiten, stellt gleichzeitig aber die Marktaufsicht vor große technologische Hindernisse. Beispielsweise werden in der Dosimetrie inzwischen fast ausnahmslos mobile, netzgestützte Dosimeter eingesetzt. Dabei nimmt das mobile Dosimeter, mit einem Desktop-Computer verbunden, über das Internet Kontakt zu einer Cloud-Infrastruktur des Herstellers auf. Dieser kann darüber aus den erfassten Daten Messergebnisse erzeugen, in einer Datenbank ablegen

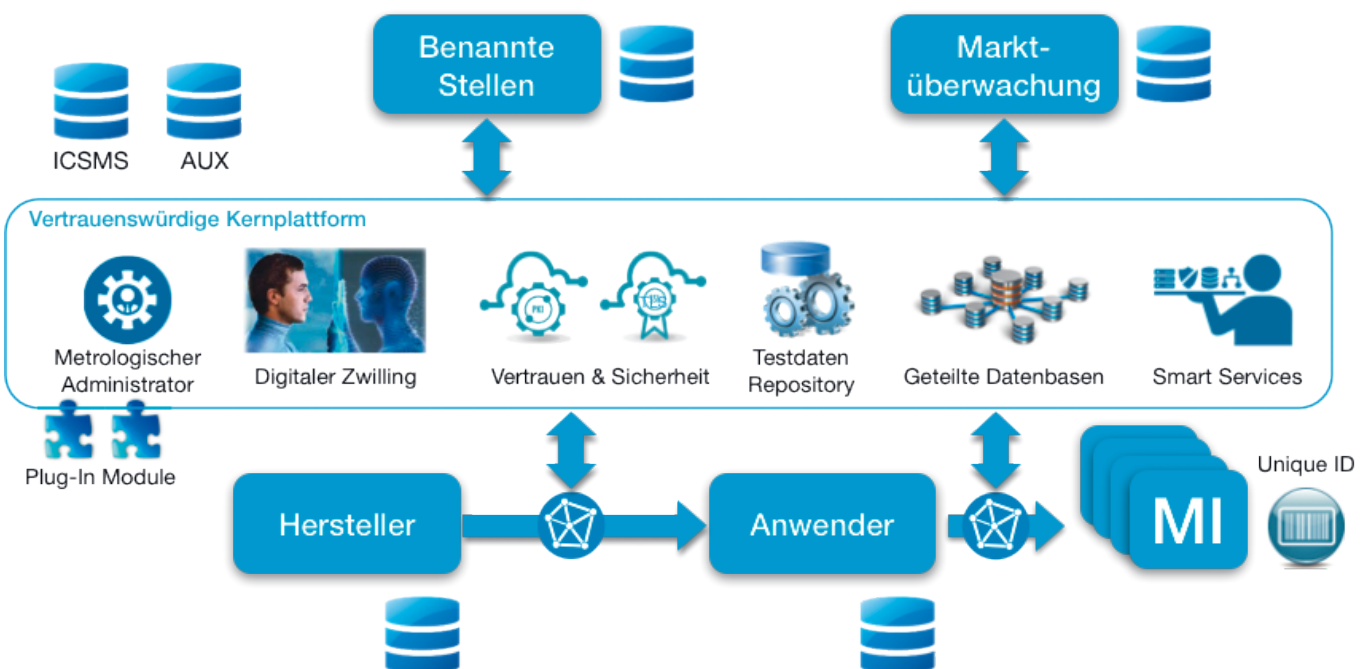
und die Software des Gerätes aktualisieren, um bspw. die Kalibrierparameter anzupassen. Diese Vorgehensweise ist inzwischen Stand der Technik, aber mit dem deutschen Eichrecht und den Strahlenschutzrichtlinien nicht vereinbar.

Darüber hinaus bietet die verteilte, vernetzte und teilweise virtualisierte Infrastruktur mit den bereits allein in Deutschland vorhandenen 170 Millionen Messgeräten im Bereich der Zulassung und Marktüberwachung umfangreiche Möglichkeiten für die Nutzung von Big-Data-Lösungen basierend auf den während des Lebenszyklus des Messgerätes anfallenden Datenmengen. Derzeit sind diese Datenbanken stark verteilt, nicht miteinander vernetzt und sehr heterogen (Messdaten, administrative Daten, Service-Daten). Durch die Etablierung einer digitalen Qualitätsinfrastruktur als **Metrology Cloud** kann die digitale Ertüchtigung des gesetzlichen Messwesens gelingen: Ankopplung bestehender Dateninfrastrukturen; differenzierter Zugriff aller Partner auf die „Metrology Cloud“ als Datenbasis und sicherer Zugriffsort; neue Konzepte zur Koordinierung, Konzentrierung, Vereinfachung, Harmonisierung und Qualitätssicherung von metrologischen Dienstleistungen. Beginnend mit einem vertrauenswürdigen Kern dieser digitalen Infrastruktur bei der PTB soll die „Metrology Cloud“ schrittweise zu einer „European Metrology Cloud“ ausgebaut werden, um die Idee des „Digital Single Market“ zu unterstützen. Angestoßen wird diese Idee durch die Beantragung eines dreijährigen europäischen Verbundprojekts im Rahmen des EMPIR-Programms unter Horizon 2020. Der vertrauenswürdige Kern beinhaltet die digitale Repräsentation einer jeden Bauart oder eines jeden Messgerätes, besorgt die sichere Kommunikation und eindeutige Identität, bietet Unterstützungs-

leistungen für die Marktüberwachung und wird helfen, bestehende administrative Prozesse zu verschlanken. Das Konzept der „European Metrology Cloud“ wird dabei nachdrücklich im Bericht des Wissenschaftsrates unterstützt.

In Gesetzen und Verordnungen, die den Aufgabenbereich der PTB direkt, u. a. im Bereich der Bauartzulassung von Geldspielgeräten (SpielV) oder der Konformitätsbewertung von Messgeräten (MessEG, MessEV), betreffen, werden **IT-Sicherheitsgutachten** gefordert, die vom BSI, einer BSI-anerkannten Prüfstelle oder einer vergleichbaren Stelle zu erstellen sind. Hier werden schützenswerte Güter festgelegt und damit Bewertungsstrategien abgefragt, die nicht im Betrachtungshorizont des BSI, einer BSI-anerkannten Prüfstelle oder einer vergleichbaren Stelle liegen. Diese Lücke kann eine Dienstleistungseinheit innerhalb der PTB schließen. Die Arbeitsgruppe „Geldspielgeräte“ bewertet und unterstützt bereits die IT-Sicherheitsgutachten der Hersteller für Spielgeräte im Rahmen der Bauartzulassung nach SpielV. Die Arbeitsgruppe „Metrologische Software“ bewertet und unterstützt die Risikoanalysen für Software und IT-Komponenten der Hersteller für Messgeräte im Rahmen der Konformitätsbewertung. Im Aufgabenbereich beider Arbeitsgruppen liegt derzeit die Aktualisierung und Veröffentlichung aktueller Angriffsvektoren. Zwar veröffentlicht das BSI regelmäßig allgemeine Bedrohungslagen, jedoch sind die schützenswerten Güter in regulierten Bereichen meist so speziell, dass nur die PTB entsprechende Bedrohungslagen identifizieren kann. Diese Aufgabe schließt auch die Beratung von BSI-anerkannten Prüfstelle oder einer vergleichbaren Stelle bei der Erstellung der Sicherheitsgutachten mit ein. Diese Entwicklung

Konzept der „Metrology Cloud“ als vertrauenswürdige Kern-Plattform

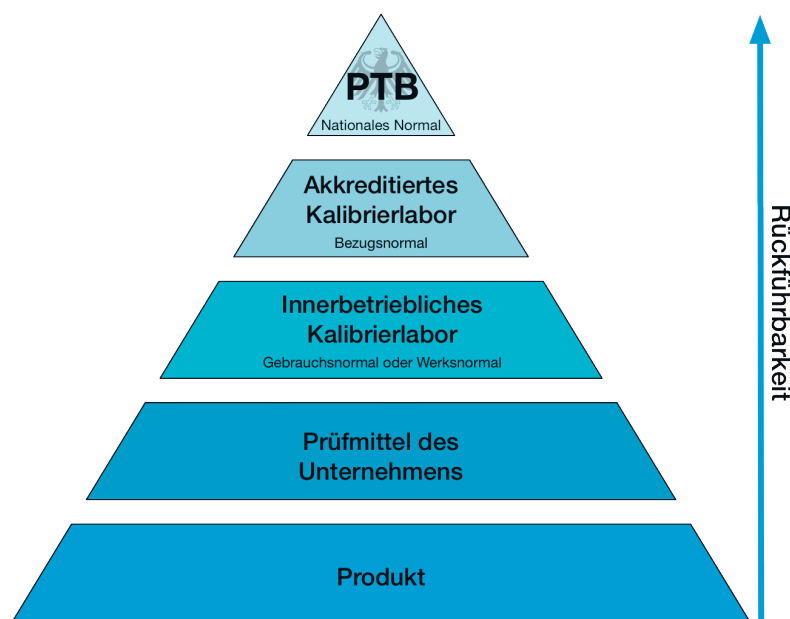


legt nahe, dass im Rahmen der „Digitalen Agenda“ auch weitere Aufgabenfelder der PTB mit gesetzlicher Beauftragung von der Notwendigkeit der Bewertung von IT-Sicherheitsrisiken betroffen sein werden. Daher wird hierfür die Gründung einer Arbeitsgruppe „Metrologische Sicherheitsgutachten und Risikoanalysen“ mit dem Charakter einer Dienstleistungs-AG für die gesamte PTB angestrebt, die selbstständig als **BSI-anerkannte Prüfstelle** agieren kann.

Die zentralisierte Datenvorhaltung ist eine zwingende Voraussetzung für den effizienten Einsatz moderner Big-Data-Analyseverfahren, wie sie bereits sehr erfolgreich zur Effizienzsteigerung im nicht gesetzlich geregelten Bereich des Messwesens eingesetzt werden. Die dort entwickelten Konzepte zu **predictive maintenance** sind prinzipiell auch für eine effizientere Gestaltung des Mess-, Eich- und Kalibrierwesens einsetzbar, wo zurzeit in der Regel starre Fristen ausgehend von Stichprobentests vorgeschrieben sind. Durch die Entwicklung geeigneter statistischer Modellierungsmethoden könnten kontinuierliche Prognosen und Qualitätssicherung der Messgenauigkeit der gesamten Messinfrastruktur auch für das Mess- und Eichwesen etabliert werden. Notwendig ist dafür jedoch eine vorlaufforientierte Forschungsarbeit an der PTB, um eine nachhaltige Änderung des Mess- und Eichgesetzes vorzubereiten. Der Fachbereich „Mathematische Modellierung und Datenanalyse“ berät bereits Verbände, DAkkS-Labore und die Marktaufsicht mit statistischen Expertisen und Verfahren. Die notwendigen Entwicklungen von Verfahren zu „predictive maintenance“ gehen jedoch weit darüber hinaus.

Qualitätsinfrastruktur

Die Qualitätsinfrastruktur (**Metrologie, Standardisierung und Akkreditierung**) ist durch die Digitalisierung in ihrer Gesamtheit betroffen, wobei sich die größten Herausforderungen zurzeit im Bereich der Standardisierung und des Kalibrierwesens, als metrologischer Teil der Akkreditierung, abzeichnen. Auf dem „Nationalen IT-Gipfel 2015“ der Bundesregierung wurde daher das Positionspapier „**Leitplanken für die digitale Souveränität**“ vorgestellt [37], welches drei wesentliche Voraussetzungen für den Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit angibt: Leistungsfähige und sichere Infrastruktur, Beherrschung von Schlüsselkompetenzen und -technologien sowie innovationsoffene Rahmenbedingungen der digitalen Souveränität. In allen drei Bereichen ist in signifikanter Weise die Qualitätsinfrastruktur in ihrer Gesamtheit zur Sicherung von Verlässlichkeit und Vertrauen in das richtige Messen gefordert. Das betrifft zum einen die Kommunikationsinfrastruktur, in welcher zukünftig die Verlässlichkeit von Hochfrequenzmessungen eine Voraussetzung für einen nachhaltigen Netzausbau sein wird [38]. Zum anderen ist aber auch das Kalibrierwesen insgesamt gefragt, effiziente, innovations- und technologieoffene Rahmenbedingungen zu schaffen, um innovationsfördernd wirken zu können [4]. Die Beherrschung von Schlüsselkompetenzen in den Bereichen der Kalibrierung, IT-Sicherheit, Messtechnik und Datenanalyse ist dabei die Grundlage für eine bedarfsorientierte Standardisierung. Entsprechend hat die Bundesregierung 2017 ihren Vorsitz der G20 dazu genutzt, **Standardisierung in der digitalen Transformation** als Schlüsselthema aufzugreifen [39]. In den Expertendiskussionen an der PTB wurde ebenso mehrfach vor einem sogenannten „**Plattformkapitalismus**“ gewarnt, der durch die

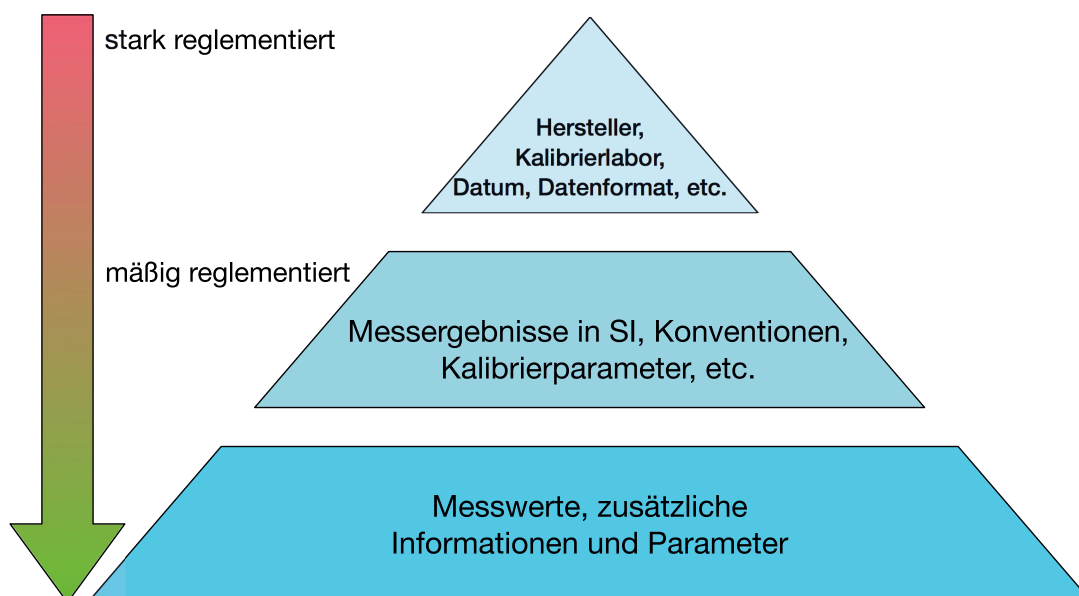


Kalibrierhierarchie in der Bundesrepublik Deutschland

Marktdominanz einzelner Unternehmen entstehen kann und der nicht zuletzt KMU ganz wesentlich bedroht. Dem kann nur mit einer flexiblen und verlässlichen Normensetzung und Standardisierung begegnet werden. Dies ist insbesondere in einer globalisierten Wirtschaft von großer Bedeutung, um die Handlungsmöglichkeiten deutscher und europäischer Unternehmen nicht durch andere globale Wettbewerber begrenzen zu lassen. Weiterhin stellt ein aktuelles IEC White Paper fest, dass ein Gelingen der Vision eines „Internet der Dinge“ mit hochgradig automatisiert operierenden Teilnehmern nur durch geeignete Standards gelingen kann [40].

Im Bereich der **Akkreditierung** spielt die PTB wegen der notwendigen Rückführung auf das SI für akkreditierte Kalibrierlabors eine Schlüsselrolle. Die Aufgabenteilung zwischen der PTB und der DAkkS (Deutsche Akkreditierungsstelle) mit mehr als 400 akkreditierten Laboratorien (sowie auch der Marktaufsicht mit den Eichbehörden) orientiert sich dabei an der Kalibrierhierarchie in Deutschland, an deren Spitze die PTB steht, und der internationalen Norm ISO 17025 [41], in welcher die wesentlichen Anforderungen an akkreditierte Kalibrierlabors festgelegt sind. Diese Norm ist prinzipiell technologieoffen gestaltet und erlaubt die Verwendung digitaler Formate. Im Zuge der Digitalisierung werden die Aspekte der digitalen Information und digitaler Kommunikationswege zunehmend wichtig, auch um den gestiegenen Anforderungen aus der Industrie gerecht zu werden. Somit kann die PTB durch die digitale Transformation des Kalibrierwesens die Digitalisierung der Wirtschaft und Industrie massiv unterstützen, indem digitale Geschäftsprozesse durch entsprechende digitale Schnittstellen in der Messkette und der Qualitätsinfrastruktur begleitet werden.

Für die PTB als per Auftrag verantwortliche Stelle für die Spitze der Rückführungshierarchie ist daher die Entwicklung eines **digitalen Kalibrierscheins** eine essenzielle Aufgabe. Dabei ist im Sinne der zweiten Welle der Digitalisierung ein digitaler Kalibrierschein nicht allein ein elektronisches Dokument als Pendant zum derzeitigen Papierformat, sondern eine virtuelle Repräsentation der für den Kalibrierschein relevanten Informationen. Das bedeutet insbesondere, dass die Daten zur Verwendung der Kalibrierung (z. B. Skalierungsfaktor, Temperaturbereiche, Linearität) standardisiert maschinenlesbar und -verarbeitbar sein müssen. Dadurch wird es möglich, die Informationen der Kalibrierung automatisiert in Industrie-4.0-Szenarien einzusetzen. Zum Beispiel könnte ein Sensor in einer Anlage durch einfaches Hinzufügen zum bestehenden Sensornetzwerk eingesetzt werden und die Software zur Anlagensteuerung adaptiert sich selbsttätig basierend auf den digitalen Kalibrierinformationen (plug'n'measure). Der „**digitale Zwilling**“ des Sensors wird damit automatisch aus dem digitalen Kalibrierschein generiert. Für die Entwicklung, Etablierung und breite Anwendung von digitalen Kalibrierscheinen ist es notwendig, Festlegungen über Struktur, Inhalt, erlaubte Maßeinheiten, Schnittstellen, Validität und Sicherheit der Datenkommunikation und digitale Siegel und Signaturen zu treffen. Dabei spielen Authentizität und kryptografische Sicherung, beispielsweise mittels eines digitalen Signaturmanagements, eine entscheidende Rolle. Mit der EU-Verordnung eIDAS-VO 910/2014 wurde kürzlich der rechtliche Rahmen



Konzept eines standardisierten digitalen Kalibrierscheins

für die europaweite Anerkennung und rechtliche Einordnung digitaler Signaturen und Siegel gelegt.

Die Digitalisierung aller Bereiche der Wissenschaft und die hohe Dynamik digitaler Technik erfordern Standardisierungen insbesondere bei Daten und Metadaten, Austauschformaten, Schnittstellen, Datenmodellen, Auszeichnungssprachen und Vokabularen.“

Rat für Informationsinfrastruktur 2016

Während der digitale Kalibrierschein die korrekte Weitergabe der Einheiten vertikal entlang der Rückführungskette in der Kalibrierhierarchie realisiert, sind ebenfalls Konzepte für den korrekten horizontalen Informationsaustausch notwendig. Das bedeutet unter anderem, dass Konzepte für die SI-basierte Weitergabe von Informationen und Daten in **IoT-Netzwerken** entwickelt und umgesetzt werden müssen. Die fehlerfreie automatisierte Interpretation von Daten erfordert neben einer fehlerfreien Übertragung auch eine maschinenlesbare verlässliche Interpretation der Daten bzgl. Größe, Dimension, Einheit und ggf. **Messunsicherheitsangabe**. Datenformate werden bisher jedoch entweder ohne konsistente Implementierung für Datentypen zusammen mit den numerischen Werten angewendet oder existierende Ansätze sind entweder proprietär, spezifisch für einen Wissenschaftsbereich oder eine Programmiersprache und damit nicht interoperabel. Durch die Entwicklung eines **standardisierten Metadatenformats** kann der interoperable Austausch von metrologisch relevanten Information zu den numerischen Daten für verlässliche automatisierte Interpretation und Auswertung von numerischen Faktendaten gewährleistet werden. Das Metadatenformat sollte dafür offen, breit anwendbar und flexibel in seiner Implementierung sein, indem es grundlegende Anforderungen formuliert, die für den reibungslosen Austausch von Faktendaten in automatisierten Informationsnetzwerken notwendig sind. Derartige Metadatenformate würden auch helfen, die Interoperabilität von Datenbasen in der Analyse von Big Data zu gewährleisten [42]. In der Regel werden bei Big-Data-Analysen Daten aus verschiedenen Quellen analysiert, zum Beispiel in der Datenkorrelation. Dabei muss sichergestellt sein, dass die Daten untereinander kompatibel (Einheit, Dimension, Messunsicherheit) sind, um verlässliche Analyseergebnisse zu erhalten. In der Metrologie beschränken sich erste Bestrebungen, zum Beispiel des NIST in den USA, auf die Sichtbarmachung verschiedener Datenquellen (findable), da die Interoperabilität als extrem hohe Hürde angesehen wird. So wird beispielsweise in einer internationalen Kooperation mehrerer NMIs mit wesentlicher Beteiligung der PTB an einer „International Metrology Resource Registry“ als

Meta-Datenbank gearbeitet, um die Sichtbarkeit metrologischer Datenbanken zu erhöhen [43]. In der Regel werden anwendungsspezifische Lösungen für die Interoperabilität von Datenbasen erarbeitet, die dann für eine konkrete Situation evaluiert werden. Durch die Schaffung geeigneter harmonisierter Formate würde die automatisierte Datenanalyse signifikant unterstützt werden können. Ein erster Vorstoß des NIST mit dem Datenformat „UnitsML“ [44] ist jedoch nach eigener Aussage vor allem an dem Mangel an personellen Ressourcen gescheitert. Es hat sich in dessen Entwicklung auch gezeigt, dass die Komplexität der interoperabeltauglichen Faktendatenrepräsentation sehr hoch ist und entsprechender Kompetenzen und langfristigen Engagements bedarf.

Weiterhin spielen automatisierte Zulassungen über digitale Schnittstellen zukünftig eine große Rolle, um die Business-to-Business-Geschäftsprozesse zu unterstützen. Derzeit bietet die PTB zum Beispiel mit TraCIM [45] einen automatisierten Test von Algorithmen, basierend auf Referenzdaten der PTB, für bestimmte Aufgaben in der Koordinatenmesstechnik an. Das System erlaubt die automatisierte Fernprüfung eines Algorithmus mit Erstellung eines entsprechenden Prüfsiegels. Derartige Angebote werden zukünftig in weiten Teilen der Industrie von der PTB erwartet werden, da diese ihre eigenen Prozesse in eben dieser Weise digital transformiert.

In vielen Bereichen entstehen durch die digitale Transformation derzeit Konflikte zwischen den technologischen Möglichkeiten und den rechtlichen Rahmenbedingungen. Ein Beispiel sind Produktionsanlagen, die dem Explosionsschutz unterliegen, wo die PTB auftragsgemäß in Arbeitsteilung mit der BAM eine z. T. weltweit führende Rolle einnimmt. So sind Hersteller durch die 2014/34/EU als rechtliche Ausprägung der IEC 60079 verpflichtet, eingesetzte elektronische Geräte einer strengen Konformitätsbewertung zu unterziehen. Die zugrundeliegenden Richtlinien basieren auf der Annahme stationärer Geräte, wobei jedoch zunehmend vor allem in der Wartung mobile Geräte (z. B. Tablets) eingesetzt werden. Hier ist die PTB gefragt, geeignete Referenzarchitekturen zu entwickeln, um eine digitale Modernisierung des Explosionsschutzes zu realisieren. So kann beispielsweise die Entwicklung geeigneter **Software-basierter Lösungen** Alternativen bieten, indem situationsbezogene Sicherheitseinstufung verwendet werden, anstelle starrer Regeln. Rechtskonforme Anforderungen und Referenzsysteme an der PTB ermöglichen somit die Vermeidung von der Verwendung nicht zugelassener Geräte.

In ähnlicher Weise ergeben sich in vielen weiteren Bereichen neue Aufgaben aus der gesetzlichen

Beauftragung der PTB. So werden beispielsweise in der Medizin ebenso wie in der Umweltüberwachung zunehmend vernetzte Messsysteme und Echtzeitanalysen eingesetzt, wohingegen die Rückführung derzeit überwiegend auf die Labordiagnostik ausgerichtet ist. Neue digitale Technologien ermöglichen beispielsweise eine **Online-Überwachung** in der Medizin (point-of-care diagnostic) und der Umweltanalytik (Wasser, Luft, Fahrzeuge). Weiterhin eröffnen digitale Kommunikationswege die Möglichkeit für Fernwartung, Ferndiagnose und Fernkalibrierung. Die Überwachung der Richtigkeit der Messergebnisse vor allem im medizinischen Bereich ist für derartige Online-Systeme ebenso wichtig wie in der stationären Labordiagnostik. Das erfordert die Entwicklung von Methoden zur Kalibrierung von Messgeräten per remote control, Konzepte für die zuverlässige Datensicherung und Datenübertragung sowie für die Rückführung von Messergebnissen im Online- oder Onboard-Betrieb. Die PTB stellt die nationalen Normale für die Qualitätssicherung in der Labordiagnostik und ist daher gefordert, dies auch im Bereich moderner Diagnostik- und Analytikmethoden fortzusetzen. Besonders im Bereich der Abgasanalytik bei Verbrennungsmotoren ist dabei aufgrund des Aufkommens digitaler Manipulatoren mit neuen Aufgaben für die PTB zu rechnen.

Die Weitergabe der gesetzlichen Zeit ist eine der hoheitlichen Aufgaben der PTB. Im Zuge der digitalen Transformation stellen sich dabei eine Reihe von neuartigen Herausforderungen und Möglichkeiten. So würden echtzeitfähige Methoden der Analyse großer Datenmengen (Big-Data-Analyse) neue Einblicke in die kontinuierlich aufgenommenen Messdaten zur Beurteilung hochgenauer optischer Uhren erlauben. Gleichzeitig entstehen durch die Vernetzung digitalisierter Industrien und Märkte neue Herausforderungen für die Weitergabe der Zeit. So tritt ab 2018 die europäische Regulierung des Algorithmengesteuerten Finanzhandels durch die **MiFID-II-Richtlinie** in Kraft, mit der Forderung nach rückführbaren Zeitstempeln mit 1 μ s Auflösung und maximal 100 μ s Abweichung von UTC. Im Moment existiert dafür noch keine metrologische Infrastruktur in Form akkreditierter Laboratorien in Deutschland. Zwischen den NMIs finden bereits Messungen von Signallaufzeiten mittels transportabler, kalibrierter Empfänger mit niedriger Unsicherheit statt, um die UTC-Beiträge zu ermitteln. Eine Möglichkeit, die deutsche Finanzindustrie zu unterstützen, ist daher die Entwicklung von Kalibrierverfahren für den Einsatz im Netzwerk von Finanzinstituten basierend auf den Methoden für den Vergleich zwischen NMIs und die Entwicklung von Methoden zur Überwachung und Dokumentation. Durch eine Qualifizierung und Akkreditierung von Kalibrierlaboratorien kann die Aufgabe dann dau-

erhaft durch externe Labore übernommen werden. Vorbereitungen für diese Unterstützung durch die PTB wurden bereits begonnen.

In Internet-of-Things-Netzen werden Daten kontinuierlich zentral erfasst und weiterverarbeitet. Insbesondere in Industrie-4.0-Umgebungen mit dem Anspruch einer Echtzeit-fähigen Datenanalyse für die automatisierte Produktion spielt die **Zeitsynchronisation** eine entscheidende Rolle [46]. Prinzipiell lassen sich von einer lokalen Zeitreferenz geeignete Zeitstempel ableiten und den Daten zuordnen. In unternehmensweiten und globalen Netzwerken verlangt dieser Ansatz jedoch die Synchronisation solcher Zeitreferenzen, um global erfasste Daten zeitlich korrelieren zu können. In Bereichen, in denen bereits eine Zeitsynchronisation technisch notwendig oder gesetzlich gefordert ist, wie beispielsweise in der Telekommunikation oder Stromindustrie, wird der für die Synchronisation der Zeitreferenzen notwendige Aufwand durch die Unternehmen betrieben und entsprechende Hardware eingesetzt. Die Voraussetzung für den breiten Einsatz entsprechender Technologien, wie beispielsweise dem NTP-Protokoll (Zeitangabe über Netzwerke mit variabler Paketlaufzeit) oder dem **PTP-Protokoll** (Fokus auf höhere Genauigkeit und lokal begrenzte Netzwerken), ist jedoch ihre einfache Umsetzbarkeit. So bauen inzwischen viele Hersteller von aktiven Netzwerkkomponenten zunehmend PTP-Hardwarelösungen in ihre Geräte ein. Diese Entwicklungen muss die PTB zukünftig in der Weitergabe der gesetzlichen Zeit geeignet abbilden. Weiterhin bietet sich auch die Entwicklung einer Abwandlung des **WebSocket-Protokolls** als Ergänzung für NTP an, da es eine breite Unterstützung von Browsern und Programmiersprachen besitzt und eine einfache Umsetzung in Software erlaubt. Damit ist es prädestiniert für den Einsatz in IoT auch im industriellen Bereich, wo vielfach Web-Technologien zum Einsatz kommen. Durch die Entwicklung eines entsprechenden WebSocket-Dienstes der PTB würde eine Weitergabe der Zeit für eine breite Anwendung in IoT- und anderen Netzwerken ermöglicht werden.

Metrologie in der Analyse großer Datenmengen

Allen Analysen und Studien gemein ist die Feststellung, dass erst durch eine geeignete Analyse der Daten Wissen bzw. Information erzeugt werden kann. Das BMWi unterstützt entsprechend mit 30 Mio. Euro die Förderinitiative „**Smart Data – Innovation aus Daten**“ [6] für die Entwicklung leistungsfähiger Verfahren, um aus der Flut von Rohdaten wirtschaftlich nutzbare Informationen zu gewinnen. Neben der IT-Sicherheit ist demnach der effiziente Umgang mit den stark anwachsen-

den Datenmengen ein Kernthema der Digitalisierung [47]. Die zunehmend vernetzte Unternehmenslandschaft mit billigen Datenspeichern, digitalen Sensoren und preisgünstiger Datenkommunikation führt zu einer rasant anwachsenden Datenmenge [48]. Daten werden dabei oftmals als das „Öl des 21. Jahrhunderts“ oder „fruchtbarer Boden“ bezeichnet.

„The vast majority of all data (in fact up to 90 %) has been generated in the last two years.“

Realising the European Open Science Cloud 2016

So führen neue Messverfahren, wie beispielsweise in der medizinischen Bildgebung, der industriellen Computertomografie oder der Strahldichtemessung leuchtender und reflektierender Oberflächen, zu **rasant wachsenden Datenmengen**. In vielen Fällen steigt in gleicher Weise die Dimensionalität der zu bestimmenden Messgröße. So kann zum Beispiel mittels des Nahfeldgoniophotometers der PTB der Lichtstrom einer Lichtquelle räumlich aufgelöst gemessen werden. Die Messgröße ist in diesem Fall extrem hochdimensional und mit den etablierten Verfahren der Qualitätsinfrastruktur nicht handhabbar. Andererseits werden solche hochdimensionalen Daten eingesetzt, um beispielsweise die Geometrie lichtführender Bauteile in Simulationen virtuell zu entwerfen. Im Zuge der digitalen Transformation in der Industrie wird hier in Zukunft auch die Rückführung auf SI-Einheiten und damit die PTB eine tragende Rolle spielen müssen.

Die Querschnittsforschung an der PTB in den Bereichen mathematische Modellierung, statistische Datenanalyse und Verfahren zur Messunsicherheitsbestimmung in einem zentralen Fachbereich „Mathematische Modellierung und Datenanalyse“ legt die Grundlage für eine Reihe von spezialisierten Projekten und Leitfäden. Durch die Mitarbeit in Gremien zur Harmonisierung der metrologischen Datenanalyse unterstützt die PTB weiterhin die Vernetzung der verschiedenen Anwendungsgebiete. Durch die steigenden Datenmengen, Dimensionalität der Messgrößen und komplexeren Analyseverfahren sieht sich die PTB hier vor rasant wachsende Anforderungen gestellt. So stellen sich in einer wachsenden Zahl von Anwendungen Herausforderungen für die Messdatenauswertung durch komplexe Datenstrukturen mit hoher Dimensionalität, Variabilität und Volatilität, sowie sehr unterschiedlicher **Datenqualität**. Bereits heute stoßen in der Metrologie anerkannte Verfahren zur Bestimmung von Messunsicherheiten für viele Anwendungen an ihre Grenzen in Bezug auf Dimensionalität und Rechenzeit. Digitalisierung und computerbasierte Messverfahren verstärken diesen Trend und führen zu immer grö-

ßeren Datenmengen und Parameterräumen in verteilten Messsystemen, komplexen **Computersimulationen** oder multiparametrischen medizinischen Daten (Bildgebung, Protein- und Genanalysen, bzw. Biochemie). Die zunehmend enge Verzahnung von Messung und Messdatenauswertung führt dabei zu einer steigenden Bedeutung von mathematischen und statistischen Verfahren. Die Übertragung etablierter und anerkannter Verfahren auf Situationen mit großen Datenmengen (z. B. durch Simulationen) und langen Rechenzeiten (z. B. wegen aufwendiger Modelle) ist sehr herausfordernd. Daher sollen skalierbare mathematische und statistischer Werkzeuge entwickelt werden, die als Ergänzung zu etablierten Verfahren agieren, sodass ein reibungsloser Übergang zwischen kleinen und großen Datenmengen möglich wird.

Eine Möglichkeit ist hierbei die **Dimensionsreduktion**. Dabei werden gezielt die in den Daten vorhandenen Strukturen ausgenutzt, um den Datenumfang bei gleichbleibendem Informationsgehalt zu reduzieren. Da hierfür tiefgreifendes Wissen über die Messung ebenso unabdingbar ist wie die gemeinsame Entwicklung von effizienteren Messverfahren und Auswertemethoden, ist die gemeinsame Forschungsarbeit des Fachbereichs „Mathematische Modellierung und Datenanalyse“ und den experimentellen Fachbereichen notwendig. So führen in einer Vielzahl von Anwendungen neue computergestützte Messverfahren im Fachbereich „Photometrie und angewandte Radiometrie“ zu großen Datenmengen in der Kalibrierung, wie beispielsweise bei der messtechnischen Erfassung des sog. „Strahlkörpers“ einer Lichtquelle, wo bei einer einzelnen Messung ca. 100 GB an Messdaten anfallen. Bereits absehbare Erweiterungen der zugrundeliegenden Messverfahren erlauben zusätzlich spektral aufgelöste Messungen, was zu einer weiteren deutlichen Steigerung der Datenmengen führen wird. Auch der Wissenschaftsrat sieht hier signifikanten Forschungsbedarf:

„Im Rahmen der Messungen fallen immense Mengen mehrdimensionaler Daten an, für die aber unklar ist, welche verarbeitbaren Informationen daraus abgeleitet werden können. Wünschenswert wäre eine Intensivierung der Forschungsanstrengungen hinsichtlich der Datenauswertung und -nutzung.“

WR2017

In Anwendungen, in denen die Reduktion der Daten-Dimensionalität aufgrund der angestrebten Anwendungen nicht sinnvoll ist, müssen praktikable und verlässliche Methoden für die **Weitergabe großer Datenmengen** entwickelt werden. Dabei ist weniger der Datenspeicher oder die Datenübertragungsraten ein Problem, sondern ein geeignetes Datenformat. Beispielsweise werden an der PTB rückführbare Messungen von Reflexionsnormalen

angeboten, wie sie von einer Vielzahl von Geräteentwicklern, Kalibrier- und Prüflaboratorien benötigt werden. Hier wird für Messungen der bidirektionalen Reflektanzverteilungsfunktion von Oberflächen ein einheitliches standardisiertes Datenformat benötigt, welches die hochdimensionalen komplexen Daten inklusive der Messunsicherheiten und Oberflächeninformationen geeignet abbilden kann und eine verlässliche Datenanalyse erlaubt. Dabei muss die fehlerfreie computergestützte Interpretation der Daten gesichert sein. Basierend auf der Messinfrastruktur und Erfahrung im Fachbereich „Bild und Wellenoptik“ und seiner langjährigen erfolgreichen Zusammenarbeit mit dem Fachbereich „Mathematische Modellierung und Datenanalyse“ können hierfür entsprechend geeignete Datenformate und Analysemethoden entwickelt werden.

Methoden zum „Data mining“ und andere Korrelationsmethoden sind eine vielfach eingesetzte Methode zum Beispiel in der Echtzeitdatenanalyse in „Industrie 4.0“. Dabei werden Sensordaten kontinuierlich ausgewertet und zueinander in Beziehung gesetzt. In der Metrologie ist ein derartiges Beispiel die **Datenkorrelationsanalyse** von Photovoltaikmodulen entlang ihrer Wertschöpfungskette. Mithilfe einer entsprechenden Entwicklung geeigneter Mess- und Rückführungsmethoden können Datenanalyseverfahren entwickelt werden, die beispielsweise eine frühzeitige Reaktion im Fehlerfall und eine Verknüpfung von Leistungseinbrüchen im Solarpark mit der Wafer-Fertigung erlauben würden. Da hierfür fundierte Kenntnisse und Entwicklungen im Bereich der Messverfahren ebenso notwendig sind wie die Entwicklung geeigneter mathematischer und statistischer Verfahren, ist auch hier eine gemeinsame Forschungsarbeit der Fachbereiche „Photometrie und angewandte Radiometrie“ und „Mathematische Modellierung und Datenanalyse“ notwendig.

Beispiele für hochdimensionale Messergebnisse finden sich auch in vielen Bereichen der Nanometrologie, zum Beispiel bei der Modellierung des Signalkontrasts mittels Monte-Carlo-Methoden zur Auswertung von Messungen an Nano-Objekten in Rasterelektronenmikroskopen. Weiterhin finden bildgebende Verfahren in der dimensionellen Messtechnik und optische Oberflächenmesstechnik zunehmend Anwendung, bei denen große Datenmengen anfallen und bearbeitet werden müssen. Die Bestimmung von Unsicherheitseinflüssen in diesen Bereichen ist teilweise nur durch aufwendige **Simulationsrechnungen** möglich. Dies erfordert in der Regel eine Dimensionsreduktion zur vereinfachten Handhabung der Daten. Ähnliche Ansätze finden auch vermehrt Anwendung im Fertigungsumfeld, wo zum Beispiel optische Messmethoden angewendet werden, welches die Notwendigkeit für die Entwicklung

von Methoden für Aussagen über Qualität der Messunsicherheit bei der Anwendung dimensionsreduzierender Verfahren ergibt. Dabei muss die Entwicklung generischer Verfahren stets von konkreten Anwendungen und damit im Kooperation mit der Entwicklung des Messverfahrens realisiert werden. Unter anderem können angepasste Messverfahren durch eine geeignete Wahl der Messpunkte bereits zu einer hinreichenden Dimensionsreduktion führen.

In der Forschung ist eine rasant steigende Zahl von Publikation auf dem Gebiet der Analyse großer Datenmengen und automatisierter Analyse von **Big Data**, zum Beispiel durch maschinelles Lernen und künstliche neuronale Netze, zu beobachten [11, 49]. Aktuell entwickelte Methoden basieren in der Regel auf der etablierten Theorie künstlicher neuronaler Netze, verwenden aber eine zunehmend große Zahl von Zwischenlagen (engl. ‚hidden layers‘) zwischen Eingabe und Ausgabe [11]. Diese Methoden werden allgemein als **deep learning** bezeichnet. Durch die steigende Verfügbarkeit spezialisierter Hardware, frei verfügbarer Software und sehr großer Datenmengen, sind die Methoden des „deep learning“ in zunehmend mehr Bereichen relevant [50]. Aus Sicht der Qualitätsinfrastruktur und insbesondere der Metrologie ist hier vor allem der Aspekt der Verlässlichkeit der Ergebnisse von großer Relevanz. Eine metrologische Behandlung solcher Verfahren der Datenanalyse ist bisher jedoch nicht verfügbar. Auch außerhalb der Metrologie ist die Untersuchung der Verlässlichkeit der Datenanalyse und die Entwicklung von Methoden zur quantitativen Beurteilung der Ergebnisqualität ein Thema aktueller Forschung, zum Beispiel am Fraunhofer HHI in Berlin [51]. Im Allgemeinen steht die Entwicklung von Methoden für die Bestimmung von Unsicherheiten und Qualitätsaussagen bei „deep learning“ jedoch noch am Anfang. In kritischen Bereichen stellt sich zusätzlich die Frage nach der Manipulierbarkeit von Ergebnissen des maschinellen Lernens durch gezielte Veränderung der Eingangsdaten. Dieser Forschungsbereich, genannt „adversarial learning“ [52], wird auch für die Metrologie zukünftig relevant sein.

Metrologie der Kommunikationssysteme für die Digitalisierung

Die Verfügbarkeit verlässlicher, leistungsfähiger und flexibler Kommunikationswege ist eine vielfach zitierte Voraussetzung für das Gelingen der digitalen Transformation, siehe z. B. [38]. Dabei wird vor allem der Ausbau der **5G-Technologie** rasant vorangetrieben. So zitiert der Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (VDE) Branchenexperten, die einen Roll-out

von 5G in Deutschland noch vor 2020 als realistisch ansehen [53]. Auch die G20 haben in ihrer Analyse „Key Issues for Digital Transformation in the G20“ die Notwendigkeit für den schnellen Ausbau von 5G durch eine gezielte staatliche Förderung betont und als Zielstellung sogar einen Roll-out für 2018 empfohlen [39]. Derzeit werden unter dem Begriff „5G-Technologie“ in der Regel funkbasierte Kommunikationstechnologien im hohen Megahertz- oder Gigahertz-Frequenzspektrum zusammengefasst. Ein finaler 5G-Standard existiert derzeit noch nicht, so dass noch teilweise offen ist, welche konkreten Anforderungen erfüllt werden müssen. So definiert zum Beispiel die „Next Generation Mobile Networks Alliance“ als Anforderungen an einen 5G Standard: Verfügbarkeit sehr hoher Datenraten (100 Mbit/s bis 1 Gbit/s) auch für große Nutzergruppen gleichzeitig, mehrere hunderttausend gleichzeitige kabellose Verbindungen, deutlich effizientere Nutzung des Spektralbereichs im Vergleich zu 4G, deutlich verringerte Latenz im Vergleich zu LTE und gesteigerte Effizienz in der Übertragung [38].

„5G will operate in a highly heterogeneous environment characterized by the existence of multiple types of access technologies, multi-layer networks, multiple types of devices, multiple types of user interactions, etc.“

NGMN White Paper 5G

In der 5G-Kommunikation und der digitalen Modulation sind die **Hochfrequenzmessgrößen** im Allgemeinen sehr komplex, nichtlinear, stochastisch und hochdimensional. Beispielsweise spielt die Quadratur-Amplituden-Modulation (QAM) mit hoher Konstellationszahl (64 – 4096) verstärkt eine Rolle in der Hochfrequenz-Nachrichtentechnik. Die dafür notwendige Sende- und Empfangstechnik muss hochgenau charakterisiert sein, um Übertragungsfehler zu minimieren. So erfordert eine effiziente Nutzung des elektromagnetischen Spektrums bzgl. Reichweite, Kanalkapazität und Kanaldichte die Kenntnis nichtlinearer und stochastischer Kenngrößen im Spektralbereich (Oberwellengehalt, Signal-zu-Rauschabstand, passiver Intermodulationsgrad, Oszillatorphasenrauschen, etc.). Rückgeführte Messungen dieser nichtlinearen und stochastischen Größen sind daher die Voraussetzung für die **Kalibrierung von Hochfrequenzmessgeräten** und den Auf- und Ausbau digitaler Kommunikationssysteme.

Bisher existiert die Rückführung fast ausschließlich für Grundgrößen (unmodulierte Dauerstrichsignale, lineare Charakterisierung), obwohl kommerzielle Messgeräte für nichtlineare Kenngrößen auch in Deutschland entwickelt werden. Eine Aufnahme derartiger Messgeräte in die Kalibrierhierarchie würde den entsprechenden Unter-

nehmen einen signifikanten Wettbewerbsvorteil ermöglichen. Demgemäß steigt derzeit durch die Digitalisierung der Bedarf an einer Erweiterung des Akkreditierungsumfangs der DAkkS-Labore für nichtlineare und stochastische Kenngrößen. Gemäß der Kalibrierhierarchie ist jedoch die Voraussetzung dafür eine entsprechende Rückführung derartiger Größen an der PTB.

Weiterhin spielen in der Antennenmesstechnik im Zuge der Transformation zu 5G-Netzen Antennen-Arrays mit MIMO-Technologie (multiple input multiple output) bis in den Millimeterwellen-Bereich eine zunehmende Rolle [54]. Eine Sicherung der Verlässlichkeit derartiger Systeme erfordert die metrologische Charakterisierung der eingesetzten Sende- und Empfangstechnik ebenso wie die rückführbare Kalibrierung der für die Charakterisierung verwendeten Messgeräte. So ist beispielsweise eine Untersuchung der technischen Umsetzung der Bündelung zeitvarianter Kanäle bei unterschiedlichsten Frequenzen und Ausbreitungsbedingungen (massive MIMO) notwendig.

Die Entwicklung hin zu selbstkonfigurierenden, intelligenten Systemen mit hohen Anforderungen an Interoperabilität in hochkomplexen Kommunikationsprotokollen führt zur Notwendigkeit der Rückführung von Signalparametern wie Modulationsgrad und -hub, Error-Vector-Magnitude (EVM) und Fehlerraten (Modulation/Bit/Frame Error Rate). Die Weiterentwicklungen der Messmittel und Antennensysteme benötigen genaue Kenntnis der Kanal-Laufzeiten, -Dämpfung und der Pulsaufweitung der einzelnen Ausbreitungspfade. Die Verfügbarkeit entsprechender metrologischer Dienstleistungen in Deutschland wäre ein Wettbewerbsvorteil in einem zurzeit noch von den USA und China dominierten Markt. Entsprechende Vorarbeiten an der PTB stellen das THz Communication Lab¹, EVM-Messungen mithilfe digitaler Echtzeitoszilloskope, die Kalibrierung von Vektorsignalanalysatoren, die Messung elektrisch gewandelter optischer **Modulationskenngrößen** sowie erste Arbeiten zur Charakterisierung von „Smart Antennas“ dar.

Den dafür notwendigen Forschungsbedarf hat zum Beispiel auch das NIST bereits seit längerem erkannt und massiv in das „Communications Technology Lab“ und ein Forschungsprogramm „**mmWave, 5G & beyond**“ investiert [55]. Die Arbeiten des NIST sind dabei für mindestens 20 Jahre Forschung ausgelegt. Das NPL baut seine Forschungsaktivitäten in diesem Bereich ebenfalls massiv aus und hat dazu gerade ein gemeinsames Forschungszentrum „Nonlinear Microwave Measurements and Modelling Laboratories“ mit der „University of Surrey“ gegründet².

¹ <http://www.tcl.tu-bs.de/>

² <http://n3m-labs.org>

Metrologie für Simulationen und virtuelle Messgeräte

In mehreren Anwendungsgebieten in der Metrologie sind Simulationen und virtuelle Experimente bereits seit einiger Zeit etabliert. So wird zum Beispiel in der **Koordinatenmesstechnik** durch die ISO 15530-4 die simulationsbasierte Messunsicherheitsbestimmung für definierte Messaufgaben abgedeckt [56]. Mit dem „**Virtuellen Koordinatenmessgerät**“ (**VCMM**), einer Auswertesoftware für Koordinatenmessgeräte, besitzt die PTB ein selbstentwickeltes Referenzverfahren, das beispielsweise von größeren Herstellerfirmen wie Zeiss und Hexagon in ihren Koordinatenmessgeräten implementiert ist, aber auch bereits in Kalibrierlaboratorien der DAkkS transferiert wurde [57]. Die Auswertung der Messdaten inklusive einer Bestimmung von Messunsicherheiten erfolgt automatisiert, effizient und mit digitaler Schnittstelle zur weiteren Verarbeitung in der vernetzten Infrastruktur. Die Herstellerunabhängigkeit der PTB und das Vertrauen in ihre weltweit führende Position bei der Entwicklung simulationsbasierter Auswertesoftware für die Messunsicherheitsbestimmung sind ideale Voraussetzungen für einen weiteren Ausbau der Einsatzmöglichkeiten. Letztlich wird das Ziel verfolgt, die Methode des virtuellen CMM auf alle in der Fertigung relevanten Messgeräteklassen zu transferieren, um valide Aussagen zu den erzielten Messunsicherheiten der im Fertigungsumfeld gemäß „Industrie 4.0“ eingesetzten Messgeräte und Sensoren bereitzustellen. Hier ist auch eine strategische Zusammenarbeit der Fachbereiche „Koordinatenmesstechnik“ und „Mathematische Modellierung und Datenanalyse“ angestrebt, um die Entwicklung generischer Methoden für die simulationsbasierte Messdatenauswertung voranzutreiben.

Im Bereich der optischen Messverfahren besitzt die PTB mit ihrer weltweiten Spitzenposition in der optischen, flächigen Asphärenmetrologie und dem bereits vielfach erfolgreich angewandten Simulationswerkzeug „**SimOptDevice**“ zur optischen Strahldurchrechnung unter Berücksichtigung statischer mechanischer Einflüsse ideale Voraussetzungen für die Entwicklung eines holistischen Simulationswerkzeugs für optische Formmessgeräte [58]. Der modulare Aufbau und die Verfügbarkeit der Softwarequellen erlauben prinzipiell einen sehr breiten Einsatz für die Durchführung virtueller Experimente innerhalb der PTB. Bestimmte Messverfahren basieren sogar zwingend auf einer physikalisch-korrekten Simulation. Beispielsweise verwendet das an der Universität Stuttgart entwickelte und auch an der PTB für die Asphären-Metrologie betriebene „**Tilted wave interferometer**“ eine Simulation des Strahlengangs, um die Abweichung des Prüfb-

jekts von einer digital gegebenen Designvorlage zu bestimmen [59, 60]. Hierbei wird das durch die Simulation erhaltene virtuelle Messergebnis mit dem tatsächlichen verglichen, um aus den Abweichungen die tatsächliche Oberflächenstruktur des Prüfbjekts zu erhalten. Eine der größten Herausforderungen stellt in derartigen Experimenten die Gewährleistung der Rückführbarkeit auf die SI-Einheiten dar. Durch die Komplexität des physischen Aufbaus und der verwendeten Simulationsverfahren besteht hier ein signifikanter Forschungsbedarf.

Algorithmen finden ebenfalls vermehrt Anwendung in der Erfassung und Verwendung von Daten aus integrierten, vernetzten Messsystemen zur Qualitätsüberwachung und **automatisierten Fertigungssteuerung**, zum Beispiel in der Integration von Methoden der additiven Fertigung im Fertigungsumfeld mit dem Ziel der Effizienzsteigerung und dem Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit. Resultierend daraus stellen sich neue Aufgaben für die Rückführbarkeit und Messunsicherheitseinflüsse für integrierte, vernetzte Messsysteme, unter anderem durch die Entwicklung von Normalen für den Einsatz in der anwendungsnahen Messung und Steuerung. Insbesondere **additive Fertigungsverfahren** werden zunehmend im industriellen Umfeld eingesetzt in Ergänzung zu etablierten Methoden, beispielsweise zur Effizienzsteigerung. Derartige Verfahren bieten durch ihre lagenweise Fertigungscharakteristik großen Spielraum für mehr Designfreiheit und Optimierung nach verschiedenen Kriterien. Die Entwicklung geeigneter „In-Prozess-Messverfahren“ für die Steuerung additiver Fertigung sowie die metrologische Charakterisierung der Fertigungsgenauigkeit stellen jedoch große Herausforderungen dar. Die PTB investiert derzeit in entsprechende Produktionsanlagen – zum einen zur effizienteren und flexibleren Fertigung im eigenen Gerätebau, zum anderen zur Realisierung von metrologischen Forschungsprojekten. Erste Forschungsarbeiten an der PTB wurden bereits in dem europäisch geförderten und 2016 abgeschlossenen Forschungsprojekt „Traceable in-process dimensional measurements“ durchgeführt.

Als Folge der vernetzten Messsysteme verlangen die Kunden von Sensorikherstellern zunehmend nach **intelligenten Messsystemen**, die – mit entsprechender Software ausgestattet – automatisiert und teilweise autonom Ergebnisse erzeugen und mit anderen Sensoren und Einrichtungen interagieren können (Einkauf von Messwerten statt Messgeräten). Die weiterhin steigende Notwendigkeit der Präzision und Verlässlichkeit der Messergebnisse führt dazu, dass zunehmend Messgeräte mit digitalen Schnittstellen und eingebauter Auswertesoftware kalibriert werden müssen, beispielsweise in akustischen und dynamischen

Anwendungen. Bisher sind Messeinrichtungen und Messverfahren an Metrologieinstituten in der Regel nicht dafür ausgerüstet, Messgeräte zu untersuchen, bei denen der Anzeigewert bereits einer Vorverarbeitung unterzogen wurde. Dies stellt die NMIs vor allem dann vor neue Herausforderungen, wenn weder die Auswertelgorithmen noch die analogen Rohdaten direkt einsehbar sind. Hier werden neue Messfähigkeiten ebenso benötigt, wie neuartige Herangehensweisen für die Konformitätsbewertung.

Technologische Infrastruktur

Die identifizierten neuen Aufgabenbereiche für die PTB setzen in weiten Teilen eine Veränderung der IT-Infrastruktur voraus. So erfordert die geplante Einrichtung einer „Metrology Cloud“ **leistungsfähige Serversysteme** mit sehr hoher IT-Sicherheit und kontinuierlicher Wartung, um das vorhandene Vertrauen in die PTB als „trustworthy core“ in dem Konzept aufrecht erhalten zu können. Dasselbe gilt für das Konzept eines digitalen Kalibrierscheins und den digitalen Schnittstellen zu Referenzdaten der PTB.

Für die in der digitalen Transformation notwendige Einrichtung einer elektronischen Dokumentenablage hat die PTB bereits mit den Vorbereitungen für die Einführung einer **E-Akte** begonnen. Die geplante elektronische Dokumentenverwaltung stellt eine zentrale, Server-gestützte Verwaltung interner Dokumente bereit, welche kooperatives Arbeiten, digitale Signaturen, Zugriffskontrolle und Archivierungsmethoden umfasst. Dazu wurden von einer übergreifenden Organisationsgruppe für alle internen dokumentenbasierten Geschäftsprozesse der PTB entsprechende Anpassungen der Abläufe an das E-Aktensystem vorgenommen. Erste interne Pilotprojekte starten voraussichtlich Anfang 2018 mit einem schrittweisen Roll-out bis etwa Ende 2020. In der Erarbeitung der notwendigen Prozessstruktur sollen die geplanten Konzepte eines digitalen Kalibrierscheins und digitaler Kundenschnittstellen bereits eingebracht werden, um hier eine Kompatibilität der Systeme abzusichern.

Die Analyse großer Datenmengen und die Bearbeitung hochdimensionaler mathematischer und statistischer Problemstellungen erfordern einen geeigneten **IT-Service für rechenintensive Prozesse**. Hier ist es notwendig, abteilungs- und fachbereichsübergreifend eine Bereitstellung von High-Performance-Computing(HPC)-Lösungen, Parallel Computing, hochverfügbaren skalierbaren Speichern und spezielle IT-Services anbieten zu können. Ein nachhaltiger Ausbau dieser Technologien könnte zum Beispiel durch die Entwicklung geeigneter interner Gebührenmodelle für spezialisierte Dienste realisiert werden. Hier ist die Bun-

desanstalt für Materialforschung (BAM) derzeit ebenfalls in der Erarbeitung eines Konzepts. Ein Austausch von Informationen und Erfahrungen zwischen PTB und BAM ist bereits begonnen worden und soll fortgeführt werden. Am NIST in den USA existiert bereits ein internes IT-Serviceangebot für die **Cloud-basierte Speicherung** und Archivierung von öffentlich zugänglichen Forschungsdaten, welches auf einem internen Gebührenmodell basiert. Die Erfahrung am NIST zeigt jedoch, dass die Voraussetzungen für die tatsächliche Nutzung derartiger Angebote ein möglichst leichter Zugang zu den Services und ein gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis sind. Dies kann zum Beispiel durch den Aufbau von Kompetenzen in der Softwareentwicklung realisiert werden, um zentralisiert an der Entwicklung von Schnittstellen zu Daten, Datenbanken und Parallel Computing und der Vereinheitlichung der Softwarebibliotheken für wissenschaftliche Querschnittsaufgaben zu arbeiten. Auf nationaler Ebene existieren derzeit eine Reihe von Initiativen, wie beispielsweise des Deutschen Forschungsnetzwerkes (DFN), Cloud-Infrastrukturen in Form sogenannten „Infrastructure as a service“ (IaaS) aufzubauen und zentral verfügbar zu machen [61]. Jedoch ersetzen IaaS-Angebote nicht die Notwendigkeit, Software-schnittstellen zu entwickeln und nachhaltig zu pflegen. Andernfalls können die ggf. eingekauften Angebote nur sehr unzureichend ausgenutzt werden, da die technologischen Anforderungen an ihren nutzbringenden Einsatz vergleichsweise hoch sind.

Über die Leistungsfähigkeit der Rechnersysteme und deren Speicherkapazität hinaus wird weithin ein tragfähiges und einheitliches Konzept für das **Forschungsdatenmanagement** als „Bedingung für exzellente Forschung“ (Hochschulrektorenkonferenz) angesehen. Entsprechend gibt es eine wachsende Zahl von Förderinitiativen wie beispielsweise vom BMBF zur Erforschung und Erarbeitung von Lösungen für die Herausforderungen zum Forschungsdatenmanagement. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) und die Europäische Kommission erarbeiten darüber hinaus verpflichtende Vorgaben für geförderte Projekte. Diese sollen sicherstellen, dass die im Rahmen solcher Projekte erhobenen Forschungsdaten öffentlich zugänglich gemacht werden. Auf europäischer Ebene ist mit der **European-Open-Science-Cloud-Initiative** ein massiver Vorstoß in Richtung einer harmonisierten europäischen Forschungsdatenlandschaft begonnen worden. Das zuständige Gremium empfiehlt entsprechend: „*We recommend that use of present and future instruments in research programming, including Horizon 2020, should only support projects that properly address Data Stewardship issues for open data.*“ Damit ist zeitnah eine effiziente Infrastruk-

tur für die Handhabung von Forschungsdaten für die PTB als wichtiger Projektpartner in vielen Horizon-2020-Projekten unabdingbar. Entsprechende interne Vorgespräche dazu haben bereits begonnen und als erste Anforderungen wurden identifiziert, dass ein zentraler IT-Service für nachhaltige Sicherung von Forschungsdaten, ein flexibler, Personen- oder Gruppen-bezogener Zugriff auf Daten, sowie Schnittstellen für externen Zugriff auf geeignete Daten ermöglicht werden sollte.

„Angesichts der steigenden Datenintensität von Wissenschaft gewinnt die Kuration als Voraussetzung der Nachnutzung rapide an Bedeutung.“

Rat für Informationsinfrastruktur 2016

Ein Ziel der europäischen Initiativen ist die Auffindbarkeit und Dokumentation von Daten. Eine wesentliche Voraussetzung dafür sind harmonisierte **Metadatenstrukturen** und Datenstandards. Auf nationaler Ebene ist mit der Initiative von **GovData**, ein einheitliches Format für öffentliche Verwaltungsdaten zu definieren, bereits begonnen worden. Inzwischen existieren etliche Datenformate und Metadatenstrukturen. Teilweise lassen sich automatisierte Verfahren für die Generierung von sog. „reichen Metadaten“ zum Beispiel auf Grundlage wohldefinierter Prozesse der Entstehung der Daten entwickeln. Im Allgemeinen verlangt dies jedoch eine kontinuierliche Aufgabe für

„hoch qualifiziertes Personal mit fachlichen sowie informationstechnischen Kenntnissen, um z. B. Interoperabilität zwischen Datensätzen in einem Repositorium zu gewährleisten.

Die bloße Ablage unkuratierter Daten durch Forschende leistet dies nicht und reduziert das Wertschöpfungspotenzial im Datenlebenszyklus“

Rat für Informationsinfrastruktur 2016

Literaturverzeichnis

- [1] “Digitalisierung”, [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Digitalisierung>. [Zugriff am 29.3.2017].
- [2] RfII – Rat für Informationsinfrastrukturen, “*Leistung aus Vielfalt. Empfehlungen zu Strukturen, Prozessen und Finanzierung des Forschungsdatenmanagements in Deutschland*”, Göttingen, 2016.
- [3] BITKOM, “*Industrie 4.0 – Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland*”, Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V., Berlin, 2014.
- [4] F. Thiel und M. Esche, “*Digitalisierung im gesetzlichen Messwesen*”, PTB-Mitteilungen, Nr. 4, 2016.
- [5] D. Schaudel, “*Sensor 4.0 für Industrie 4.0*”, 12. Dresdner Sensor Symposium, 2015.
- [6] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, “*Smart Data – Innovation aus Daten*”, 2016.
- [7] BITKOM, “*Big Data im Praxiseinsatz – Szenarien, Beispiele, Effekte*”, 2012.
- [8] McKinsey Global Institute, “*The internet of things: mapping the value beyond the hype*”, 2015.
- [9] G. P. Sullivan, R. Pugh, A. P. Melendez and W. D. Hunt, “*Operations & Maintenance Best Practices: A Guide to Achieving Operational Efficiency*”, Pacific Northwest National Laboratory, U. S. Department of Energy, 2010
- [10] pwc, “*Industry 4.0: Building the digital enterprise*”, Global Industry 4.0 Survey, 2016.
- [11] Yann LeCun, “*Deep Learning*”, Nature, Bd. 521, pp. 436–444, 2015.
- [12] C. Eckert, “*IT-Sicherheit und Industrie 4.0*”, IM+io, Fachzeitschrift für Innovation, Organisation und Management, Nr. 1, 2014.
- [13] VDE Cybersecurity, “*Funktionale Sicherheit und Informationssicherheit in Zeiten von Industrie 4.0 und Smart Home*”, [Online]. Available: http://conference.vde.com/fs/2017/Documents/Nachberichterstattung_Funktionale%20Sicherheit%20und%20Informationssicherheit%20in%20Zeiten%20von%20Industrie%204.pdf. [Zugriff am 15.01.2018].
- [14] M. Vickers, “*Calibration Lab Vectors of Vulnerability*”, CAL LAB: THE INTERNATIONAL JOURNAL OF METROLOGY, p. 40, September 2016.
- [15] U. Grottker und R. Meyer, “*Konfigurationsanforderungen an Betriebssysteme*”, in Metrologische IT, Bd. 4, PTB-Mitteilungen, 2016, Seiten 33–43.
- [16] VDMA, “*IMPULS – Digital vernetztes Denken in der Produktion*”, 2016.
- [17] Optech Consulting, “*Industry Report of Photonic 2013*”, [Online]. Available: <http://www.spectaris.de/photonic-praezisionstechnik/presse/artikel/seite/branchenreportphotonik-2013-wirtschaftsdaten-einer-schlüsseltechnologie/presse-1.html>. [Zugriff am 26.6.2017]
- [18] BMBF Photonik Forschung Deutschland, “*2020 Agenda Photonik*”, VDI Technologiezentrum, 2016.
- [19] N. Leffler und F. Thiel, “*Im Geschäftsverkehr das richtige Maß – Das neue Mess- und Eichgesetz*”, Schlaglichter der Wirtschaftspolitik, 2013.
- [20] BMJV, “*Gesetz über das Inverkehrbringen und die Bereitstellung von Messgeräten auf dem Markt, ihre Verwendung und Eichung sowie über Fertigpackungen*”, [Online]. Available: <http://www.gesetze-im-internet.de/messeg/index.html>. [Zugriff am 30. 3. 2017].
- [21] BMJV, “*Verordnung über das Inverkehrbringen und die Bereitstellung von Messgeräten auf dem Markt sowie über ihre Verwendung und Eichung*”, [Online]. Available: <http://www.gesetze-im-internet.de/messev/index.html>. [Zugriff am 30.3.2017].
- [22] European Commission, CEN, CENELEC, ETSI, “*New Approach Standardisation in the Internal Market*”, [Online]. Available: <http://www.new-approach.org>. [Zugriff am 29.3.2017].
- [23] Plattform Industrie 4.0, “*Landkarte Industrie 4.0*”, [Online]. Available: <http://www.plattform-i40.de/I40/Navigation/DE/In-der-Praxis/Karte/karte.html>. [Zugriff am 29.3.2017].
- [24] atos, “*Journey 2020 – Digital Shockwaves in Business*”, 2017.
- [25] BMWi, BMBF, “*Plattform Industrie 4.0*”, [Online]. Available: <http://www.plattform-i40.de>. [Zugriff am 29.3.2017].

- [26] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, “*Monitoring-Report Wirtschaft DIGITAL 2016*”, 2016.
- [27] Plattform Industrie 4.0, “*Labs Networks Industrie 4.0*”, [Online]. Available: <http://lni40.de>.
- [28] BMWi, “*Mittelstand 4.0*”, [Online]. Available: <http://www.mittelstand-digital.de/DE/Foerder-initiativen/mittelstand-4-0.html>. [Zugriff am 29.3.2017].
- [29] DKE, VDE, DIN, “*Standardization Council Industrie 4.0*”, [Online]. Available: <http://sci40.de>. [Zugriff am 29.3.2017].
- [30] European Commission, “*Digital Single Market*”, [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/policies/shaping-digital-single-market>. [Zugriff am 15.1.2018].
- [31] BMBF, “*Horizon 2020*”, [Online]. Available: <http://www.horizont2020.de>. [Zugriff am 29.3.2017].
- [32] EFRA, “*European Factories of the Future Research Association*”, [Online]. Available: <http://www.effra.eu>. [Zugriff am 29.3.2017].
- [33] European Commission, “*Realising the European Open Science Cloud*”, 2017.
- [34] Finanzbehörde Geschäfts- und Koordinierungsstelle GovData, “*GovData – Das Datenportal für Deutschland*”, [Online]. Available: <http://www.govdata.de>. [Zugriff am 29.3.2017].
- [35] Physikalisch-Technische Bundesanstalt, “*Metrologische IT*”, Bd. 4, Braunschweig: PTB-Mitteilungen, 2016.
- [36] NIST, “*US Government Cloud Computing Technology Roadmap Volume I & II*”, 2014.
- [37] BMWi, “*Leitplanken digitaler Souveränität*”, Nationaler IT-Gipfel, 2015.
- [38] ngnm, “*NGNM 5G White Paper*”, 2015.
- [39] OECD, “*Key issues for digital transformation in the G20*”, 2017.
- [40] IEC, “*IoT 2020: Smart and secure IoT platform*”, International Electrotechnical Commission, 2016.
- [41] DIN, EN, ISO, IEC 17025:2005-08 “*General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*”.
- [42] NIST, “*Big Data Interoperability Framework – NIST SP 1500*”, NIST Special Publication, 2015.
- [43] R. Hanisch, International Metrology Resource Registry, Sèvres: NIST, 2016.
- [44] NIST, “*Units Markup Language (UnitsML)*”, [Online]. Available: <http://unitsml.nist.gov>. [Zugriff am 29.3.2017].
- [45] TraCIM e. V., “*TraCIM Service*”, [Online]. Available: <https://tracim.ptb.de/tracim/index.jsf>. [Zugriff am 29.3.2017].
- [46] Intelligente Technische Systeme OstWestfalen-Lippe (it's owl), “*Auf dem Weg zu Industrie 4.0 – Erfolgsfaktor Referenzarchitektur*”, it's OWL Clustermanagement GmbH, Paderborn, 2015.
- [47] V. Markl, “*Breaking the Chains: On Declarative Data Analysis and Data Independence in the Big Data Era*”, in Proceedings of the VLDB Endowment, 2014.
- [48] Fraunhofer IAIS, “*Big Data – Vorsprung durch Wissen*”, Sankt Augustin, 2016.
- [49] L. Wassermann, “*Statistics versus Machine Learning*”, [Online]. Available: <https://normaldeviate.wordpress.com/2012/06/12/statistics-versus-machine-learning-5-2/>. [Zugriff am 30.3.2017].
- [50] BITKOM, “*Germany – Excellence in Big Data*”, 2016.
- [51] Fraunhofer, “*Dem Computer beim Denken zuschauen*”, Forschung kompakt, 2017.
- [52] C. M. Daniel Lowd, “*Adversarial Learning*”, Proceedings of the Eleventh ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery in Data Mining, 2005.
- [53] VDE “*Umfrage: Digitale Transformation bis 2025 abgeschlossen*”, [Online]. Available: <https://www.vde.com/de/presse/pressemitteilungen/mitgliedsumfrage-5g>. [Zugriff am 29.3.2017].
- [54] VDE ITG, “*Intelligente Mobilfunkantennen, VDE ITG Positionspapier*”, März 2014. [Online]. Available: <https://shop.vde.com/de/vde-positionspapier-intelligente-mobilfunkantennen>.
- [55] NIST, “*5G & beyond*”, [Online]. Available: <https://www.nist.gov/programs-projects/5g-beyond>. [Zugriff am 29.3.2017].
- [56] ISO, “*Geometrical Product Specifications (GPS) – Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement – Part 4: Evaluating task-specific measurement uncertainty using simulation*”, 2008.
- [57] Carl Zeiss GmbH, “*Artifacts – Measuring machine monitoring to ensure the reliability of your measuring results*” EN 60-020-165II.
- [58] PTB, “*Formmessung gekrümmter optischer Oberflächen*”, [Online]. Available: <https://www.ptb.de/cms/nc/ptb/fachabteilungen/abt8/fb-84/ag-842/formmessung-8421.html#c68736>. [Zugriff am 29.3.2017].
- [59] Mahr, “*Tilted Wave Interferometer zur schnellen und flexiblen Messung und Analyse asphärischer Linsen*”, [Online]. Available: <https://www.mahr.com/de/Leistungen/Fertigungsmesstechnik/Produkte/MarOpto---Messgeräte-für-die-Optikindustrie/MarOpto-Tilted-Wave-Interferometer/>. [Zugriff am 29.3.2017].
- [60] PTB, “*Tilted-Wave Interferometer*”, [Online]. Available: <https://www.ptb.de/cms/de/ptb/fachabteilungen/abt4/fb-42/ag-421/tilted-wave-interferometer.html>. [Zugriff am 29.3.2017].
- [61] Deutsches Forschungsnetzwerk, “*Material der 66. Betriebstagung*”, [Online]. Available: <https://www.dfn.de/dfn-cloud/weiterentwicklung/workshop-maerz-2017/>. [Zugriff am 31.3.2017].

Content

PTB Digitalization Strategy

▪	Executive Summary	43
▪	Introduction	45
▪	Challenges for PTB as the cornerstone of quality infrastructure and legal metrology	49
▪	Digitalization topics: new tasks of PTB	53
	Legal metrology	54
	<i>Quality infrastructure</i>	56
	<i>Metrology in the analysis of large quantities of data</i>	59
	<i>Metrology of the communication systems for digitalization</i>	61
	<i>Metrology for simulations and virtual measuring instruments</i>	62
	Technological infrastructure	63
▪	References	65

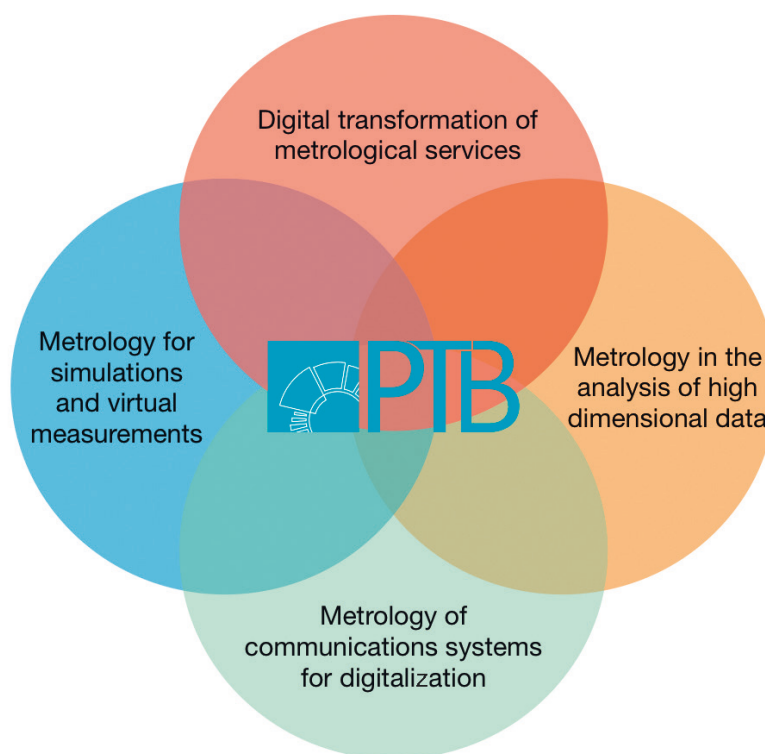
PTB Digitalization Strategy

Editor Sascha Eichstädt¹

“In the course of economic digitalization (the virtual utilization of resources, “Industrie 4.0”, the Internet of Things, etc.), PTB should play a key role in metrology for measurands linked to the Internet and to digitalization, especially in the fields of metrology, standardization and calibration, and for reference quantities in information technologies.”

Report of the German Council of Science and Humanities, 2017

¹ Dr. Sascha Eichstädt,
Working Group
“Coordination
Digitalization”,
e-mail:
sascha.eichstaedt@
ptb.de



“We are willing to develop the quality infrastructure (standardization, accreditation and conformity assessment, metrology, technical product safety and market surveillance) further, since it is, as an integral part of the technological revival in Germany, the brand essence of “Made in Germany”. For this purpose, the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) and the BAM Federal Institute for Materials Research and Testing will be further strengthened to be able to hold their ground in global competition with respect to their scientific and technical services.”

**Key Considerations of Our Innovation Policy, 2017, Federal
Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi)**

Executive Summary

Innovation and confidence in an efficient quality infrastructure are the basis of a stable and successful economy and society. The main pillar of an efficient quality infrastructure is the ability to obtain valid data based on high-precision measurements – which is the definition of metrology. The economy and society of the 21st century are in the process of a comprehensive digital transformation: the course is being set to firmly establish the basis for success in the digital arena which is the cornerstone for the development of the economy and society in the digital age. Digitalization is a process which has been developing over several years. Especially the exponential development of computing and storage capacities as well as the increasing speed of data exchange and the cost-effective availability of versatile sensors which can be used flexibly have opened up fully new possibilities when it comes to creating networks between objects and to the exploitation of the data and information stored.

The role of metrology for the digitalization of the economy and society

Measurement values, data, algorithms, mathematical and statistical procedures as well as communication and security architectures represent the basis of digital expansion and transformation. Thus, the **quality infrastructure (QI)** – the triad consisting of metrology, standardization and accreditation – and **legal metrology** (with conformity assessment, the verification system and market surveillance) will have to be made stronger as they are a prerequisite of the successful digital transformation into an interconnected economy, industry and society. The Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) as Germany's national metrology institute has a key role involving various competencies and capabilities. Besides developing and validating measurement procedures ensuring highest precision as well as algorithms and data analysis methods, these tasks also encompass

the validation of measurement data by tracing them to the International System of Units (SI). This represents part of the basis of accreditation, of legal metrology within the scope of the Measures and Verification Act (MessEG) and of the Measures and Verification Ordinance (MessEV), of the joint development of national and international standards and of advising the verification authorities within the scope of market surveillance. Against this background, PTB is a main pillar of the national quality infrastructure and of legal metrology, and has set itself the objective of acting as a reliable partner to industry and society within the scope of the digital transformation. The core of this transformation consists, in particular, of the metrology services offered by PTB in the legally controlled area along with the QI services offered as well as the German sensor and measuring instrument industries which are often organized by SMEs.

At the international level, metrology for digitalization is being intensively pushed forwards by means of research programmes and by setting up new capacity groups. For instance, several large groups at NIST (USA), together with public institutions and private economic partners, have been elaborating highly regarded regulatory and administrative foundations for the fields of cloud computing, big data, IT security and machine learning, and have been building the metrological basis for the development of high-performance communication channels (5G) for a long time. NPL (UK) has also been strongly developing the data science field as well as 5G networks and digitalization-related research. Similar activities are currently observed all over the world. PTB will develop its capacities correspondingly, so that it will live up to its role as one of the world's leading metrology institutes and lead the digital transformation and expansion of metrology.

New identified focuses

An exhaustive study based on an intensive internal analysis of PTB's core capacities, on requirements that clients have already expressed and on the results of a visit of PTB to NIST as well as on several experts' discussions has identified new fundamental tasks for PTB in order to promote digital transformation. The following new focal points have been determined:

A. *The digital transformation of metrological services*

The centre of these tasks is the digital upgrading of the quality infrastructure and of legal metrology, among other things by developing reference architectures, validated statistical procedures for predictive maintenance, an infrastructure for digital calibration certificates and, last but not least, by setting up a "metrology cloud" in the form of a digital quality infrastructure for the harmonization and development of conformity assessment and market surveillance.

B. *Metrology in the analysis of large quantities of data*

The objective consists in developing metrological analytical methods for large quantities of data and in assessing machine learning methods for big data with an emphasis on existing and increasingly relevant metrological applications for industry in which large quantities of data have to be processed and where high-dimensional information has to be derived (e.g. in imaging procedures and in photonics).

C. *Metrology of the communication systems for digitalization*

This focus concerns the securing and metrological validation of reliable, secured and efficient communication in complex scenarios. It encompasses the traceability of complex high-frequency measurands for 5G networks, nonlinear and statistical measurands in high frequency, derived measurands in digital communication systems, and complex antenna systems.

D. *Metrology for simulations and virtual measuring instruments*

By developing analytical methods and licence procedures for interconnected and virtualized measuring systems, the simulation of complex measuring systems (such as optical form-measuring techniques or coordinate metrology) for the planning and analysis of experiments,

procedures and measurement standards for automated process control and virtual measurement processes for the automatic assessment of measured data is actively supported.

Implementation strategy

The main pillars for PTB, as a supporter of digital transformation in the economy and society, are, in the first place, interdisciplinary cross-sectoral projects:

Metrology Cloud – Establishing a trustworthy core platform for a digital quality infrastructure by coupling existing data infrastructures and databases and providing all partners with customized access for digitally upgrading legal metrology.

Digital calibration certificate – Developing a secure and standardized digital information structure for universal use in calibration, accreditation and metrology as well as digitally upgrading the whole calibration hierarchy in the quality infrastructure.

Virtual experiments and mathematics-aided metrology – Developing an interdisciplinary, virtual competence group to metrologically support the paradigm change for the use of simulations and data analysis as essential components of measurement procedures.

Moreover, the metrological research for modern high-frequency networks (5G), the expansion of the quality infrastructure to online surveillance, and the metrological support to digitalized precision production are some of the tasks that will have to be furthered in the long term in the respective departments.

Introduction

The term “digitalization” actually designates the transformation of analogue quantities into discrete values for electronic storage and processing [1]. This term, however, is currently being used more generally to designate the conversion of the whole of society to the use of digital technologies [2] and the increasing involvement of data and machines in business processes by means of digital interfaces. This interconnection allowing the creation of local associations up to global networks also expresses the new quality of this digitalization process. Data are exchanged, analysed and visualized flexibly and automatically between man and machines. This opens up new communication capacities, new business fields for existing companies and has led to fully new industries and research fields. According to a BITKOM study [3], 65 % of German companies think that digitalization will change their existing business models.

“Perhaps the most significant business disruptions will come from a combination of the connected sensors, devices and objects (Internet of Things), coupled with new ways to analyze, action and monetize the resulting data streams.”

atos study “Journey 2020”

New challenges are, however, arising since it is often not possible to transfer existing concepts, standards and approaches to the digital universe and interconnected systems [4]. For instance, in the field of metrology, sensor manufacturers are being increasingly required to supply measurement capabilities rather than only measuring instruments. As a consequence, sensors are increasingly being developed in such a way that they contain additional intelligence and integrated data processing [5]. This, in turn, represents a huge challenge for traceable calibration which is no longer manageable as an approach purely conceived for precise measurement.

The quantity of data which has to be processed due to digitalization is increasing exponentially and can only be made exploitable with a profit by means of suitable mathematical and statistical tools [6,7,8]. The first step most companies take is to visualize the deluge of data in a suitable manner. To this end, the processes that take place in a facility are, for example, represented in a “digital twin” based on sensor data. Methods of “predictive maintenance” [9] go much further by drawing conclusions as to how reliable the system can be expected to be by means of statistical analyses of the data. This can help prevent fixed testing intervals – and thus unnecessary shut-downs of the facility. Such (and other) methods of intelligent and automated realtime data analysis can contribute to significantly increasing efficiency, even in facilities that are already fully automated [10]. This is usually done using model-free data analysis procedures which are “trained” to work with large quantities of data [11], which results in new challenges when it comes to determining the quality of the results obtained. At the same time, even model-based procedures increasingly need new approaches to make established data analysis concepts implementable for this rapidly increasing quantity of data (obtained from, e.g., imaging procedures). In metrology, this challenge expresses itself more and more through the necessity of determining and disseminating measurement uncertainties for high-dimensional quantities. Due to the connection of different data sources and distributed measuring systems with each other, the requirements placed on data analysis in metrology will keep increasing.

“The term “data quality” designates the quality and reliability of data objects themselves. Whenever possible, the uncertainty of a piece of data should be quantified suitably.”

**Council for Scientific Information
Infrastructures, 2016**

Moreover, like in all digitalized applications, the **IT protection objectives of integrity, confidentiality and availability** play an essential role to a different extent [12, 13]. The needs for protection thereby differ depending on the concrete requirements of the application. Also, the integrity of measuring equipment (i.e. protection against unauthorized access to measuring equipment and its calibration) plays an important role [14]. The IT protection objectives are of essential importance, especially in the legally regulated area (legal metrology) [4]. In legal metrology, ensuring integrity, confidentiality and availability are an absolute prerequisite for modern information and communication technologies (ICT) to be accepted. Furthermore, requiring the highest possible BSI (Federal Office for Information Security) standards would present manufacturers with unnecessarily high requirements and inhibit innovation and development. Here, PTB can and has to play a key role in elaborating suitable, legally flawless solutions for manufacturers, users and market surveillance.

Just as technical solutions from the non-regulated area will increasingly be applied in the field of legal metrology (e.g. cloud computing or remote maintenance), many of the solutions required for the legally regulated area will become applicable in the non-regulated area, since similar needs can be expected due to demands from users. At the same time, devices with unnecessarily high security measures will hardly make it onto the market. A similar picture can be drawn for legal metrology where manufacturers are increasingly willing to apply modern ICT. The necessary conformity assessment calls for strict rules for data communication and data processing, while providing market surveillance with technologically simple checking possibilities at the same time [15]. This balancing act will have to be mastered in order to enable the digitalization of legal metrology.

“The Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) expects “Industrie 4.0” to generate added values amounting to more than 30 billion euros per year. 80 % of industrial enterprises say that they will have digitalized their entire value chain by 2020 – which implies investing 40 billion euros per year according to the Industrie 4.0 study conducted by PWC”

BMWi & BMAS “Arbeiten in der digitalen Welt” – “Working in the Digital World”

The major driver of digital transformation is currently industry – which is reflected in concepts such as “Industrie 4.0”, the “Industrial Internet of Things” or “Cyber-Physical Systems” (CPS). A recent study conducted by VDMA [16] has shown

that 25 % of the companies operating in the fields of mechanical engineering and plant construction are already supplying novel digital technologies such as cloud services. These companies believe that the main benefit from these technologies results from increasing automation which will eventually lead to the increased competitiveness of German industry. The required knowledge no longer solely resides in pure metrology, but rather in software development and in the analysis of complex data. Thus, plant control and monitoring are increasingly implemented via so-called apps which have to be able to include data that have not been generated by the manufacturer. This requires cross-sectoral implementation and interconnections which can only be based on appropriate and accepted standards. More generally, the trend is going towards companies relying more on collaborating with other partners from industry in order to develop bilateral agreements rather than on conventional means such as standardization. One of the reasons for this is the necessity to act quickly, which results from pressure on the international market. Hence, the study conducted by VDMA recommends that companies do not wait for exhaustive standards to be developed, but rather offer initial solutions [16]. This trend has to be countered with fast, focused, user-friendly and flexible standardization projects.

Besides mechanical engineering and IT, photonics is a key technology for Germany and Europe as places for innovation. As early as 2011, it already contributed a considerable 66 billion euros of production turnover to the EU’s economic output [17]. The upcoming transition towards integrated photonic (micro-)systems and the connection with fast and powerful digital image-processing tools make photonics a strategic technology in an increasing number of markets, in products and processes. These range from controlling (e.g. gesture control, microdisplays) to data acquisition (sensors) and data processing (computational imaging) up to production (3D printing/additive manufacturing (AM), online quality measurements, laser processing) [18]. Photonics thus acts both as a driver and as a user of digitalization. Virtual experiments and simulations, in particular, are a basic tool for planning, optimizing and analysing in the field of photonics. However, there is a significant lack of reliable standards and metrological traceability [17,18]. Based on its excellent existing capabilities and on a targeted extension of its research activities, PTB will be able to play a key role in this area.

The entire field of health is also massively influenced by the ground-breaking evolutions due to digital transformation. In biotechnologies, innovative digitalization concepts are thus helping

to create resources and active substances in novel process, production and cooperation procedures. Their realization requires cross-sectoral and interdisciplinary cooperation projects with partners in both industry and research. Examples of such cooperation may be cross-sectoral networks in bio-economics with joint objectives and a shared IT infrastructure which aim to develop innovative platforms for resource- and energy-efficient investigations and to elaborate and implement bio-based products and processes. In this context, PTB is already in close contact with major German pharmaceutical companies.

Challenges for PTB as the cornerstone of quality infrastructure and legal metrology

For PTB, the challenge of the digitalization of the economy and of society results from its particular position in the legally regulated part of the quality infrastructure (with the triad consisting of metrology, standardization and accreditation) and legal metrology (with conformity assessment and market surveillance). PTB can and must act as a strong partner and facilitator between industry and standardization, based on its corresponding capabilities in the established fields of metrology and in the new areas of the IT, communications and data analysis landscape, in order to support, further and establish as soon as possible the quality infrastructure and legal metrology in their role as a promoter of innovation and as a guarantor for the sustainability of German quality. The report of the German Council of Science and Humanities correspondingly recommends that PTB

“[should] play a key role in metrology for measurands linked to the Internet and to digitalization, especially in the fields of metrology, standardization and calibration, and for reference quantities in information technologies.”

German Council of Science and Humanities, 2017

To this end, the German **quality infrastructure** represents an effective sales argument for companies which is often accepted all over the world and which now enjoys international renown as a model of a sustainable traceability chain. Standardization, which, in technical and in part in medical areas, relies on metrology, is paving the way for the (often international) market access of SMEs and for the interoperability of business models. The quality infrastructure – and thus PTB’s major task – rests on traceability (metrology), standardization and accreditation. By maintaining close cooperation with numerous partners, PTB guarantees the German economy its leading position by means of reliable and highly precise measurement capacities. For instance, PTB provides DAkkS

laboratories with experts and carries out approx. 3500 calibrations per year. PTB participates in more than 400 standardization committees and its president is, at the same time, vice-president of the German standardization body, DIN. PTB plays a central role for the conformity assessment bodies by chairing the Rule Determination Committee and by managing the conformity assessment bodies (KBS). Furthermore, PTB chairs the Deutscher Kalibrierdienst (DKD) and organizes the General Assembly of the Measures and Verification System to ensure that information and experiences are exchanged.

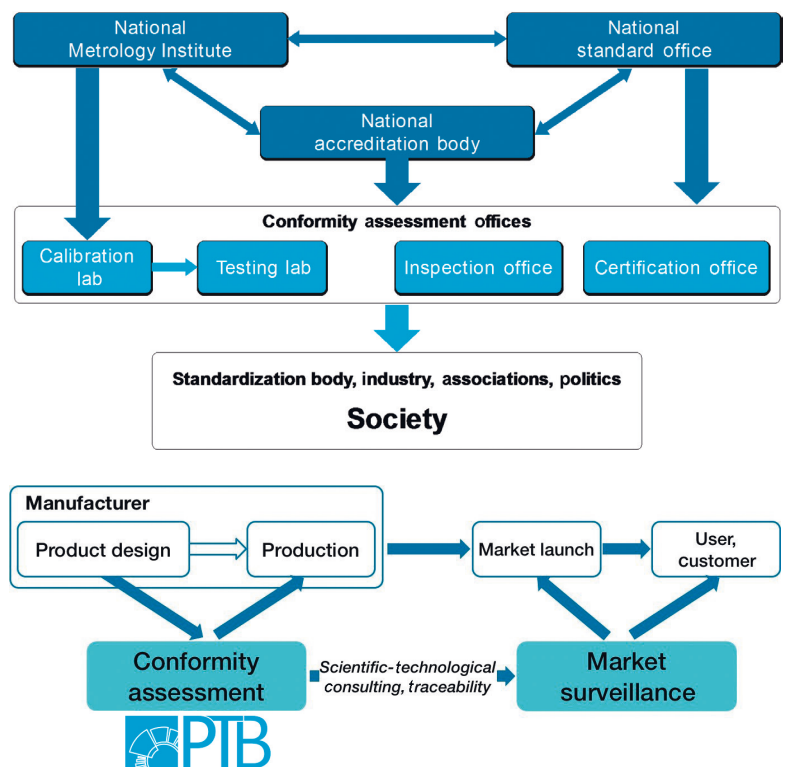


Figure 1: PTB’s role in the German quality infrastructure (top) and in legal metrology and market surveillance (bottom).

The digital transformation of products and the application of digital processes in **conformity assessment** are currently leading to a drastic increase in new challenges (e.g. for the calibration process) and require the digital transformation of the entire traceability chain. Using intelligent sensors as a product in the quality infrastructure requires suitable traceability taking both the physical properties of the transducer and the integrated digital pre-processing of the measurement data into account. At the same time, the digital transformation of the administrative processes in the traceability chain, in accreditation and conformity assessment demands appropriate standardization and a centralized, trustworthy entity for the certification of digital calibration certificates.

“Reference quantities are becoming increasingly important for the digitalized economy. Against the background of the dynamic development of cloud-based services, the demand for calibrations of digital systems is becoming increasingly urgent. [...] In this context, support to activities geared to the development of metrology for digitalization is being intensified.”

**German Council of
Science and Humanities, 2017**

Legal metrology – together with conformity assessment prior to placing products on the market as well as the verification system and market surveillance whilst in use – is the guarantor for mutual trust between clients and manufacturers. More than 170 million measuring instruments and an annual turnover amounting to approx. 150 billion euros – in Germany alone – especially in the fields of consumption meters (electricity, water, gas, fuel, etc.) and of the scales used for commercial transactions show how important legal metrology is for society and the economy [19]. At the European level, the regulatory framework is the “Measuring Instruments Directive” (MID) 2014/32/EU, which has been transposed into German national law by means of the Measures and Verification Act [20] and of the Measures and Verification Ordinance [21]. At the European level, conformity assessment (and standardization) both benefit firstly from the networks established in the form of various committees and associations. Secondly, the EU’s **“New Approach”** in the field of conformity assessment has paved the way for declarations of conformity to be recognized and accepted throughout the EU and for the corresponding inspections to be limited to essential requirements [22]. This implies a certain degree of openness to new technologies and a strengthening of European standardization and of the European single market. In the legally regulated fields, the increasingly complex IT and communications

technologies used in measuring instruments, however, are leading to an exponential increase in the time and effort spent on conformity assessment and to tremendous requirements for the verification system and for market surveillance. The risk that manufacturers might consider the latter as an obstacle to innovation is therefore increasing. What is urgently needed here are suitable types of reference architecture in order to accelerate the conformity assessment process and to support the verification and the market surveillance systems. Moreover, it is absolutely indispensable to establish a digital, cloud-based range of solutions with a centralized entity as a trustworthy basis for the digital transformation of the processes in legal metrology.

“PTB is experiencing strong support in its effort to initiate the setting up of reference architecture for secure cloud computing and to ensure its central coordination. [...] Cloud metrology should [...] contribute to implementing digital concepts for the coordination, concentration, simplification, harmonization and quality assurance of metrological services for all stakeholders in Europe.”

**German Council of
Science and Humanities, 2017**

Due to the rapidly progressing digital transformation, companies are faced with numerous new challenges which the vast majority of them consider as the most important challenge to maintaining their own competitiveness. From the examples of successful digital transformation quoted on the “Plattform Industrie 4.0” [23], it becomes obvious that the requirements placed on companies to implement this digital transformation lie mainly in the following fields:

- capabilities in the field of IT and software;
- modelling and virtual measurement process or “digital twins”;
- real-time data storage and cloud services;
- autonomous systems;
- development and integration of apps, and
- establishing a link between the virtual and the physical world (CPS).

In the meantime, these technologies have outgrown the so-called hype phase and have entered everyday industrial use [16]. The technologies needed for disruptive developments [24] in the foreseeable future are, partially, already available in a wide range and will, according to the study

[24], lead to further changes in the business world and in industry within the next 2 to 3 years. Companies are getting ready for these changes – and this to a large extent and at a rapid pace, according to the VDMA IMPULS study [16]. In contrast, digital transformation at PTB – and thus of large parts of the QI and of the verification authorities of the federal states – has clearly not reached such a developed state yet. Without an extensive, efficient and fast reaction, this deficit puts the quality infrastructure as a whole at risk of being considered as an obstacle to innovation – and thus of losing its significance.

Digitalization Topics: New Tasks of PTB

The continuous exchanges between politics, the economy and research are a prerequisite for a successful digital transformation, since only joint effort will enable us to cope with the challenges of digitalization. By gathering and interconnecting all relevant partners [25], the **“Plattform Industrie 4.0”** thereby represents the core of German national initiatives. The diverse topics are addressed in groups, and the interconnections between the partners are coordinated by a central management team. In this context, the most significant area for PTB is standardization, in particular, since PTB plays a key role by participating in more than 400 committees, both at national and at international levels, and has considerable influence, as shown by the report of the German Council of Science and Humanities. During a discussion between experts of PTB and representatives of the platform, this role was definitely confirmed, and the admittance of PTB to the platform was clearly approved. Meanwhile, PTB has been represented on the mirror committee for standardization where it will be able to contribute its longstanding experience and contacts in this field. By means of targeted research activities geared to the new challenges of digitalization and of digital transformation, PTB will be able to continue to efficiently play the key role it is currently playing in this process.

The German Federal Government and the federal ministries are supporting digital transformation via a number of packages of measures and promotion measures. For example, the lack of information identified in SMEs is addressed in a targeted manner by continuously developing so-called **“Mittelstand 4.0”** competence centres and by means of various support programmes [26]. PTB could indirectly support these projects via measures such as the digital transformation of the calibration system or by supplying reference architecture, which would contribute to digital business processes being accompanied by corresponding digital interfaces with an appropriate

security level in the measuring chain and in the quality infrastructure.

Testing centres provide SMEs particularly with the possibility to assess new technologies without having to bear any risk themselves and to develop solutions with competent partners. This area is therefore being intensely promoted by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) and by the **“Labs Networks Industrie 4.0”** (LNI4.0) association [27, 28]. PTB already distinguishes itself by its numerous cooperation projects with SMEs in which technology and know-how are transferred in the form of joint projects and licensing. By developing and offering technological solutions to deal with the challenges of digital transformation, PTB will be able to secure its position as a supporter of the German industry and economy. For this purpose, close cooperation with LNI4.0 is planned in order to use synergy effects and to increase the visibility of what PTB is offering. A first round of discussions with LNI4.0 has already taken place. The link between LNI4.0 and standardization via the **“Standardization Council 4.0”** (SC4.0) [29] and the numerous international mirror committees on which PTB is already represented are particularly important for PTB, since the technologies thus developed allow long-term support to the entire quality infrastructure. In this respect, the development of suitable testing centres at PTB benefits the German economy in two ways. In a first step, PTB, Siemens and interested partners are planning to set up a **testing field “Digital Transformation in the Quality Infrastructure”**. Moreover, existing internal activities of PTB which could, in the future, be offered as testing centres together with LNI4.0 are identified in order to support the digital transformation of the German economy in a targeted manner. For instance, it seems obvious that another testing centre of PTB in the field of virtual measuring instruments, based on the uncertainty determination specific to the measurement task for complex 3D measuring systems, would be welcome.

In the field of biotechnologies, the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) supports the creation of network projects with topics ranging from basic and advanced training to standardization; these are promoted within the scope of the “Nationale Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030” programme via the “Innovationsräume Bioökonomie”. On the initiative of industry, PTB will get involved in the “Digitalisierung der Biotechnologie” (Biotechnology digitalization) project application concerning the traceability of measured values, secure data transfer and standardization.

At the European level, an increasing number of cooperation projects and promotion initiatives have been developed. The European partners cooperate with each other following the principles of the EU strategy of a “Digital Single Market” [30] in which the objective is to establish unlimited digital trade, develop rules and standards that are able to keep up with technological advances, and seize measures aiming to enable the European economy and industry to exploit all opportunities provided by digitalization to the full. In addition to supporting selected research projects (e.g. within the scope of “Horizon 2020” [31, 32]), it is also planned to develop a strategy for a “European Open Science Cloud” within the scope of the “European Cloud Initiative” [33]. Whereas the GovData platform and the current legislative initiatives at the federal level are presently limited to administrative data, the “European Open Science Cloud” is explicitly to make research results available free of charge [33]. The first step will consist in disclosing research data obtained for new research projects from the Horizon 2020 programme. Since PTB is involved in numerous European projects realized within the scope of the Horizon 2020 programme, this development represents considerable challenges for PTB’s research data management, and these challenges will have to be addressed promptly. This necessity has also been identified by the German Council of Science and Humanities that has recommended that urgent measures be taken. PTB has already taken initial steps in this direction.

Legal metrology

In the field of legal metrology (i.e. conformity assessment, verification system, market surveillance), digitalization has mainly manifested itself through the increasing spreading of so-called “intelligent measuring systems” (e.g. smart meters) – which is partly due to the “**digitalization of the energy transition**” – distributed measuring systems and cloud infrastructures [35, 36]. All in all, considerable effort will be required in order to further the digital transformation of the legal

metrology system (and of the quality infrastructure), since the digitalization of industry depends on it in a number of areas. Thus, PTB divisions accommodating departments which are responsible for the testing of physical properties within the scope of their legal metrology tasks, have registered an increasing number of applications from industry concerning digital intelligent sensors, distributed measuring systems and cloud infrastructures. At present, the integration of modern IT and communications technologies into measuring instruments for regulated fields is still being hampered by high requirements in the approval and conformity assessment processes. Manufacturers are therefore increasingly considering the regulation and approval processes as an obstacle to innovation, and they fear these could represent a competitive drawback in the long run. PTB can support this process by **developing legally compliant reference architecture** which offers acceptable solutions with appropriate security and simple verification methods for basic technologies of new technological fields. Manufacturers using the reference architecture supplied by PTB for their measuring instruments can expect a speedy approval process and can, thus, market their innovations faster. At the same time, this reference architecture ensures compliance with the required security standards and the verifiability which is necessary for market surveillance. Especially the development of the architecture for the legally compliant division of the software of the measuring instrument into a legally relevant part and a free part allows the manufacturers to develop new, innovative solutions, regular software updates and individual client customization in the free part of the software without having to go through the approval process again.

The trend is clearly going towards measuring instruments with distributed – and for some of them even virtualized – components and towards the use of **cloud services**. This applies to an even greater extent to legal metrology. The division into units for the acquisition, processing and indicating of measured values alone provides manufacturers with various possibilities, but presents market surveillance with considerable technical obstacles. Today in dosimetry for example, mobile, web-based dosimeters are used almost without exception. Thereby, the mobile dosimeter, which is connected to a desktop computer, contacts one of the manufacturer’s cloud infrastructures via the Internet. From the acquired data, the computer can generate measurement results, store them in a database, and update the instrument’s software in order to adjust the calibration parameters. This approach has now become the state of the art; it is, however, compatible neither with the German calibration regulations nor with the radiation protection guidelines.

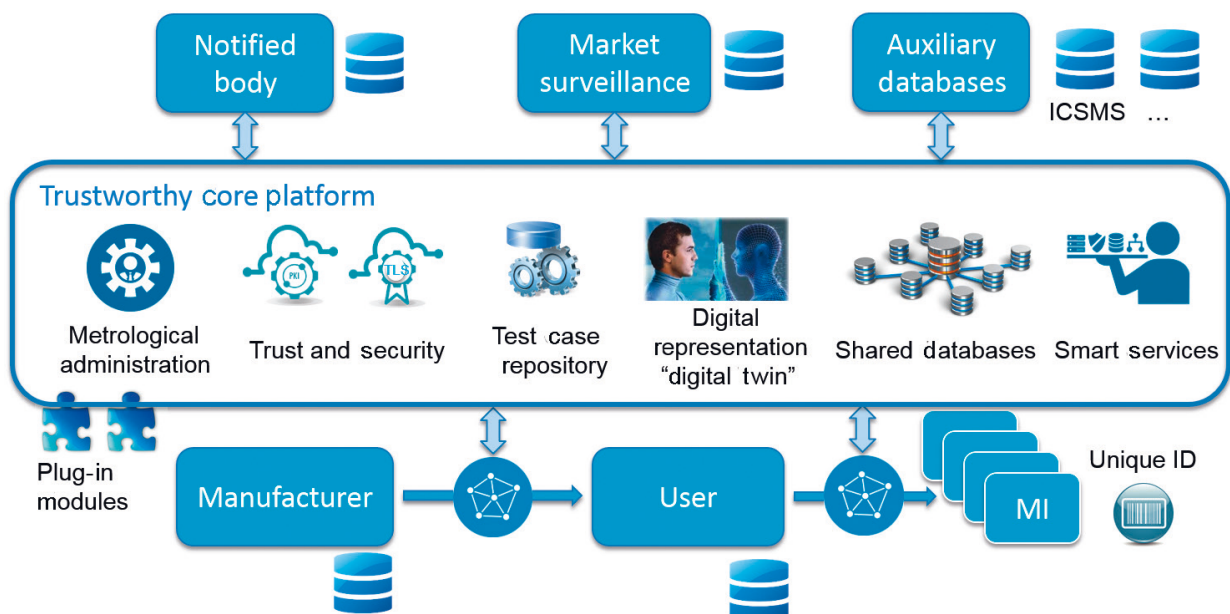
In addition, the distributed, interconnected and partly virtualized infrastructure already with 170 million measuring instruments in Germany alone in the fields of approval and market surveillance offers numerous possibilities for the use of big data solutions based on the data generated during the lifetime of the measuring instrument. These databases are currently widely distributed, not interconnected and very heterogeneous (measurement data, administrative data, service data). The digital upgrading of the legal metrology system can be achieved by establishing a digital quality infrastructure as a “metrology cloud”: coupling existing data infrastructures, differentiated access of all partners to the “metrology cloud” as a database and secure access place, new concepts for the coordination, concentration, simplification, harmonization and quality assurance of metrological services. Starting with a reliable basis of this digital infrastructure at PTB, it is planned to progressively develop the “metrology cloud” into a “European metrology cloud” to support the concept of a “Digital Single Market”. This idea will be initiated by the application for a three-year European joint project within the scope of the EMPIR programme under the Horizon 2020 programme. This trustworthy core platform includes the digital representation of every single type approval or measuring instrument, ensure secure communication and clear identification, provides support services for market surveillance and will contribute to streamlining administrative processes. In its report, the German Council of Science and Humanities thereby emphatically supports the concept of a “European metrology cloud”.

In acts and ordinances that are in direct connection with PTB’s competences (e.g. concerning the type approval of cash gaming machines (payout machines) (SpielV) or the conformity assessment

of measuring instruments (MessEG, MessEV)), **IT security expertise** reports are required; these must be issued by BSI, a test centre authorized by BSI or similar. However, in legal metrology, assets worth protecting are defined and with this, assessment strategies are needed which are not part of the topics covered by BSI, a BSI-approved test centre or similar. This gap can be bridged by a service unit within PTB. The “Cash Gaming Machines” working group already assesses and supports IT security expertise in the processes of the manufacturers of cash gaming machines within the scope of the type approval in accordance with the Gaming Ordinance (SpielV). The “Metrological Software” working group assesses and supports risk analyses for software and IT components of the manufacturers of measuring instruments within the scope of conformity assessment. Both working groups are responsible for updating and publishing topical attack vectors. BSI publishes general threats on a regular basis, however, assets worth protecting in the legally regulated area are often so specific that only PTB can identify relevant threat scenarios. This task also includes the counselling of BSI-approved test centres or similar in elaborating the security expertise reports. This development seems to suggest that within the scope of the “Digital Agenda”, further tasks of PTB that are part of its legal metrology mission will be affected by the necessity of the assessment of IT security risks. For this purpose, it is envisaged to create a “Metrological Security Expertise and Risk Analysis” working group having the characteristics of an internal service provider to act independently as a **BSI-approved test centre** for all of PTB.

Centralized data provision is an absolute prerequisite for the efficient use of modern big data analytical procedures as are already being used very successfully to increase efficiency in those

Figure 2: Concept of the “metrology cloud” as a trustworthy core platform.



areas of metrology that are not legally regulated. The concepts of “**predictive maintenance**” developed in that area can, in principle, also be applied to increase efficiency in the fields of metrology, verification and calibration where currently fixed deadlines prevail which are based on random sampling tests. By developing appropriate statistical modelling methods, it would be possible to establish continuous prognostics and to guarantee the quality of the measurement accuracy of the entire measurement infrastructure – even for metrology and verification. To this end, however, preliminary research activities at PTB would be necessary to prepare a sustainable modification of the Measures and Verification Act. The “Mathematical Modelling and Data Analysis” department already advises professional associations, DAkkS laboratories and market surveillance bodies, providing them with statistical expertise and procedures. The concepts that had to be developed for “predictive maintenance”, however, involve far more than this.

Quality infrastructure

Digitalization affects quality infrastructure (**metrology, standardization and accreditation**) in its entirety. Here, the greatest challenges seem to concern standardization and the calibration system as metrological parts of accreditation. At the “National IT Summit 2015” of the German Federal Government, the position paper “**Leitplanken für die digitale Souveränität**” (Guardrail for digital sovereignty) was presented [37]. This paper lists the three major prerequisites for maintaining competitiveness: efficient and secure infrastructure, mastering key capabilities and technologies, and digital sovereignty with framework conditions open to

innovation. In all of these three areas, ensuring reliability and confidence in correct measurements are expressly demanded from the quality infrastructure in its entirety. This concerns, for one thing, the communications infrastructure in which the reliability of high-frequency measurements will be a pre-condition for the sustainable development of the communication network [38]. For another, the entire calibration system is also expected to provide efficient framework conditions that are open to innovation and technology in order to promote innovation [4]. Mastering key capabilities in the fields of calibration, IT security, metrology and data analysis is thereby the basis of a standardization system that is geared to actual needs. Correspondingly, the German government made use of its G20 presidency to take up the topic of **standardization in digital transformation** as a key topic [39]. During discussions among experts, which took place at PTB, the term of “**platform capitalism**” was mentioned several times as a warning against the market dominance of a few companies that may result from this process and may put – not least – SMEs at considerable risk. This phenomenon can only be countered by means of flexible and reliable standardization. This is particularly important in the context of a globalized economy so that German or European companies do not see their possibilities for action limited by other global competitors. Furthermore, a topical IEC white paper lays down that the vision of an “Internet of Things” with highly automated operating participants can only be successful due to suitable standards [40].

In the field of **accreditation**, PTB plays a key role for accredited laboratories due to the required traceability to the SI. Task distribution between PTB and DAkkS (Deutsche Akkreditierungsstelle – German accreditation body)

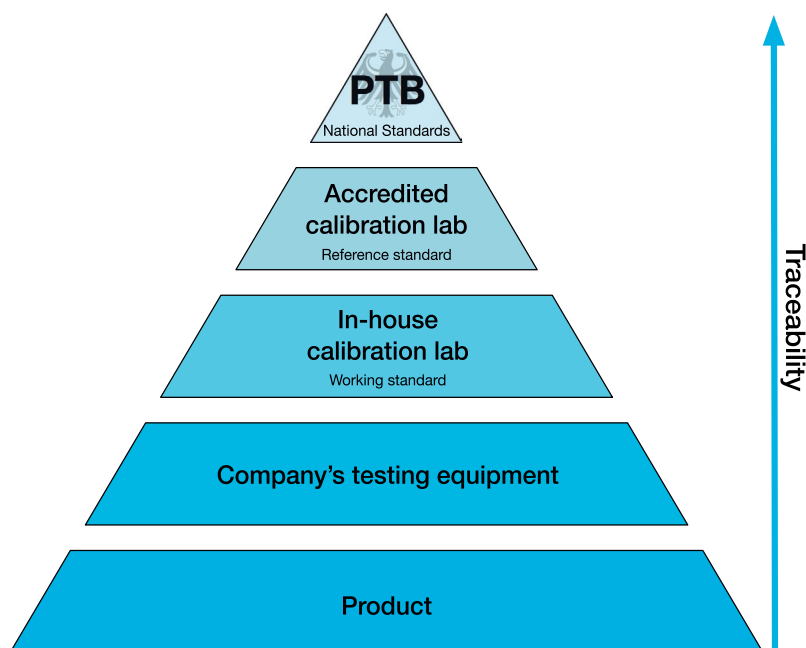


Figure 3: Calibration hierarchy in the Federal Republic of Germany.

with more than 400 accredited laboratories (as well as market surveillance with the verification authorities) is in line with the German calibration hierarchy – with PTB spearheading it – and with the international ISO 17025 standard [41], which lays down the main requirements that are placed on accredited laboratories. This standard is, in principle, conceived in such a way that it is open to technologies and allows digital formats to be used. Against the background of digitalization, the aspects of digital information and communication channels are gaining in importance, last but not least in order to meet the growing requirements of industry. Due to the digital transformation of the calibration system, PTB thus has the opportunity of considerably supporting the digitalization of the economy and of industry. This means that digital business processes are accompanied by corresponding digital interfaces within the measuring chain and the quality infrastructure.

For PTB as the body in charge of the top level of the traceability hierarchy, developing a **digital calibration** certificate is therefore the most important task. In accordance with the second wave of digitalization, a calibration certificate is not only the electronic document acting as a counterpart to the current hard copy, but rather a virtual representation of the information which is relevant for the calibration certificate. In particular, this means that the data for the application of the calibration (e.g. scaling factor, temperature ranges, linearity) must be available in such a format that they can be read out and processed automatically by a machine. This opens up the possibility of automating the use of the calibration information in industry 4.0 scenarios. For instance, a sensor could be used in a plant by simply adding it to the existing sensor network; the control software of the plant

used in this context would then adapt automatically, based on the digital calibration information (plug'n'measure). The “digital twin” of the sensor is thus generated automatically from the digital calibration certificate. For digital calibration certificates to be developed, to establish themselves and to become widely used, it is necessary to lay down rules with regard to aspects concerning the structures, the content, permitted measurement units, interfaces, the validity and security of the data transfer as well as the digital stamp and signatures. Hereby, authenticity and cryptographic security (e.g. by digital signature management) play a decisive role. EU regulation eIDAS-VO 910/2014 has recently set the legal framework for the EU-wide recognition and legal assignment of digital signatures and stamps.

“The digitalization of all areas of science and the high dynamics of digital technology require standardized procedures, especially with regard to data and metadata, exchange formats, interfaces, data models, mark-up languages and vocabulary.”

Council for Scientific Information Infrastructures, 2016

Whereas a digital calibration certificate realizes the correct dissemination of the units vertically along the traceability chain within the calibration hierarchy, concepts for the correct horizontal exchange of data are also necessary. This means, among other things, that concepts for the SI-based dissemination of information and data in **IoT networks** have to be developed and implemented. The flawless automated interpretation of data requires, besides flawless data transfer, a reliable interpretation of the data with regard to their size, dimension, unit and, if applicable, to the indica-

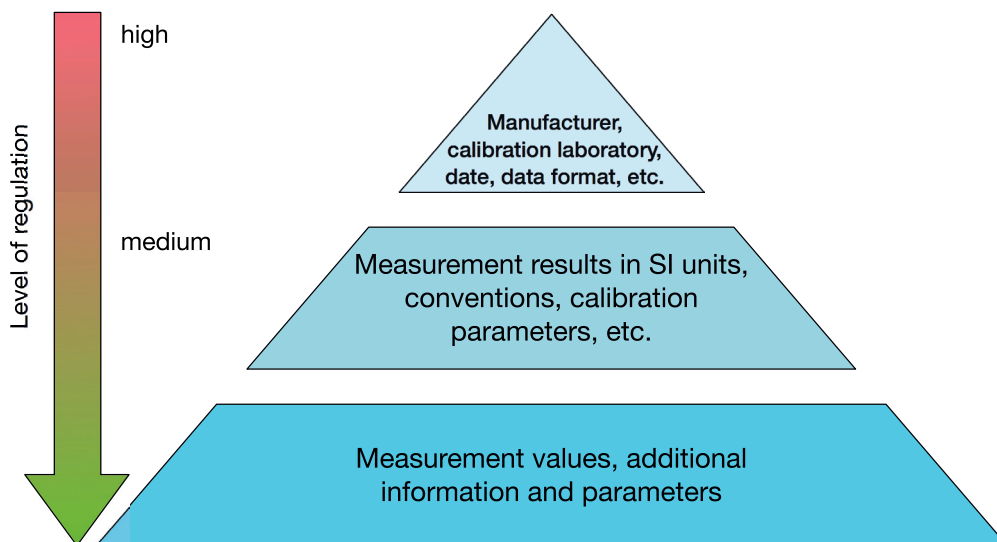


Figure 4: Concept of a standardized digital calibration certificate.

tion of the **measurement uncertainty** which can be read out by a machine. To date, however, data formats have been used either together with the numerical values for data types without consistent implementation or existing approaches have either been proprietary, specifically for a given scientific field or for a programming language and are thus not interoperable. Due to the development of a **standardized metadata format**, the interoperable exchange of metrologically relevant information concerning the numerical data can be ensured for a reliable automated interpretation and evaluation of numerical factual data. The metadata format used for this purpose should be open, widely applicable and flexible with regard to its implementation by formulating basic requirements which are necessary for the smooth exchange of factual data in automated information networks. Such metadata formats would also be helpful when it comes to ensuring the interoperability of databases for the analysis of big data [42]. As a rule, big data analyses imply data from different sources being analysed for purposes such as data correlation. Hereby, attention must be paid to the data being compatible with each other (unit, dimension, measurement uncertainty) in order to obtain reliable analysis results. In metrology, initial efforts (e.g. of NIST, USA) have been limited to make different data sources findable, since interoperability is considered as an extremely high obstacle. For instance, an international cooperation project involving several National Metrology Institutes (NMIs), with the significant involvement of PTB, has been working on an “International Metrology Resource Registry” as a database for metadata in order to increase the findability of metrological databases [43]. As a rule, application-specific solutions are developed for the interoperability of databases; these are then evaluated for a concrete situation. The creation of adequate harmonized formats would significantly support automated data analysis. NIST’s first trial with the “UnitsML” [44] data format, however, failed mainly due to a lack of human resources according to NIST’s own statement. During its development, the interoperable representation of factual data has also turned out to be very high, which requires corresponding capabilities and long-term commitment.

Furthermore, automated approvals via digital interfaces will play an important role in supporting business-to-business processes. With TraCIM [45], for example, PTB currently offers the automated testing of algorithms, based on reference data of PTB, for certain tasks in coordinate metrology. This system allows the automated remote testing of an algorithm followed by the issuing of a corresponding test mark. In the future, many industrial companies will expect PTB to provide such services, since these companies will have already digitalized their own processes in exactly the same way.

In many areas digital transformation is currently the source of conflicts between technological possibilities and the legal framework conditions in place. Examples of such conflicts are production plants which are subject to explosion protection regulations, where PTB, according to its legal tasks, plays an important (and in some cases even a globally leading) role while sharing the work with BAM (Federal Institute for Materials Research and Testing). Pursuant to 2014/34/EU as the legal transposition of IEC 60079, manufacturers are obliged to subject the electronic devices they use to a strict conformity assessment procedure. The guidelines this procedure is based on presuppose that stationary instruments are used, whereas an increasing number of mobile devices (e.g. tablets) are used, especially for maintenance purposes. In this context, PTB is required to develop suitable reference architecture to implement the digital modernization of explosion protection. For example, by developing adequate **software-based solutions**, it is possible to offer alternatives by applying a safety classification which is adapted to the concrete case instead of applying rigid rules. Legally compliant requirements and reference systems at PTB contribute to preventing the use of devices that have not been approved.

In a similar manner, new tasks arise in various other fields from PTB’s legal assignments. An increasing number of connected measuring systems and real-time analyses are used in fields such as medicine or environmental monitoring, whereas traceability is still mainly geared to laboratory diagnosis. New digital technologies allow **online monitoring** in medicine (point-of-care diagnostics) and in environmental analyses (water, air, vehicles). Furthermore, digital communication channels open up the possibility of remote maintenance, remote diagnostics and remote calibration. Monitoring the correctness of the measured values, especially in the field of medicine, is just as important for such online systems as in stationary laboratory diagnostics. This calls for the development of methods for the remote-controlled calibration of measuring instruments, but also for concepts of reliable data security and transfer and for the traceability of measurement results in the online or in the on-board mode. PTB supplies the national standards for quality assurance in laboratory diagnostics and is therefore required to further play this role also for modern diagnostic and analytical methods. PTB must expect new tasks, especially with regard to the exhaust gas analysis of combustion engines, due to the occurrence of digital manipulation.

The dissemination of legal time is one of PTB’s sovereign tasks. Against the background of digital transformation, a series of novel challenges, but also opportunities have arisen in this context.

Thus, real-time capable methods for the analysis of large amounts of data (big data analysis) would provide new insights into continuously recorded measurement data in order to assess high-precision optical clocks. At the same time, the interconnection of digitalized industries and markets has led to new challenges with regard to the dissemination of time. Hence, as early as 2018, the European regulation of algorithm-controlled financial trade will come into force via the **MiFID II Directive**, which will require traceable time stamps with 1 μ s resolution and no more than 100 μ s deviation from UTC. There is no metrological infrastructure in the form of accredited laboratories for this purpose in Germany as of yet. NMIs are already performing interlaboratory measurements of signal runtimes by means of transportable, calibrated detectors with low uncertainty in order to determine the UTC contributions. One possibility to support the German financial industry would therefore be to develop calibration procedures for use in the network of financial institutes, based on the method used for comparisons between NMIs and to develop monitoring and documentation methods. Thanks to the qualification and accreditation of calibration laboratories, this task could then be passed onto external laboratories on a long-term basis. Preparations for this support by PTB have already begun.

In “Internet-of-Things” networks, data are permanently acquired and processed centrally. Especially in “Industrie 4.0” environments with a real-time-capable data analysis ambition for automated production, **time synchronization** plays a decisive role [46]. In principle, adequate time stamps can be derived from a local time reference which can then be assigned to the data. In company-wide and global networks, this approach, however, requires such time references to be synchronized if globally acquired data are to be temporally correlated. In areas where time synchronization is technically necessary or legally required, like in telecommunications or the power industry, the effort to synchronize the time references has to be made by the companies, and corresponding hardware must be used. The prerequisite for the wide use of corresponding technologies, such as the NTP protocol (time indication via networks with a variable packet runtime) or the **PTP protocol** (with a focus on increased accuracy and locally limited networks), is an easy implementation. Thus, numerous manufacturers of active network components now increasingly use PTP hardware solutions in their devices. PTB will have to reflect these changes adequately when disseminating legal time. Furthermore, developing a modified version of the **WebSocket protocol** as a complement to NTP is useful, since it supports

various browsers and programming languages and enables simple implementation in software. It is therefore perfectly designed for use in IoT, even in the industrial field where web technologies are widely used. By developing a corresponding Web-Socket service of its own, PTB would be able to disseminate time for large-scale application in IoT and other networks.

Metrology in the analysis of large quantities of data

All analyses and studies have one thing in common, namely that only adequate data analysis can generate knowledge – or rather information. The BMWi is therefore supporting the “**Smart Data – Innovation based on data**” [6] promotion initiative with 30 million euros for the development of efficient procedures geared to obtaining economically utilizable information from the flood of raw data. Besides IT security, the efficient handling of the increasing quantities of data is a core topic of digitalization [47]. The increasingly interconnected corporate landscape equipped with cheap data storage facilities, digital sensors and inexpensive data communication systems has led to an exponential increase in the quantity of data [48]. New phrases have even been coined to designate data: they are called the “21st century’s oil” or “fertile soil”.

“The vast majority of all data (in fact up to 90 %) has been generated in the last two years”

Realising the European Open Science Cloud 2016

Hence, new measurement procedures – such as those used in medical imaging, industrial CT or radiance measurements of luminous and reflecting surfaces – have led to **rapidly increasing data quantities**. In many cases, the dimensionality of the measurand to be determined has increased correspondingly. For instance, PTB’s near-field goniophotometer can measure the luminous flux of a light source with spatial resolution. In this case, the measurand is extremely high-dimensional and is therefore not manageable for the established procedures of the quality infrastructure. Such high-dimensional data are used, for example, for virtual drafts of the geometry of light-transmitting building elements in simulations. Against the background of digital transformation in industry, traceability to the SI – and thus PTB – will have a decisive role to play in this context in the future.

Interdisciplinary research at PTB is paving the way for a number of specialized projects and guidelines in fields such as mathematical modelling, statistical data analysis and procedures for the determination of measurement uncertainty.

These are organized in a central department called “Mathematical Modelling and Data Analysis”. By cooperating in committees for the harmonization of metrological data analysis, PTB is continuing to support the intertwining of the different application fields. Due to the increasing quantities of data, to the dimensionality of the measurands and to analytical procedures that have become more complex, PTB is faced with rapidly growing requirements. An increasing number of applications represent challenges for the evaluation of measurement data by complex data structures with high dimensionality, variability and volatility as well as strongly varying **data quality**. Procedures for the determination of measurement uncertainties, which are widely accepted in metrology, are already reaching their limits in terms of dimensionality and computing time. Digitalization and computer-based measurement procedures are enhancing this trend and leading to constantly increasing quantities of data and parameter spaces in distributed measuring systems, complex **computer simulations** or multi-parameter medical data (in imaging, protein and genetic analyses and biochemistry). The connection between the measurement and the evaluation of the measurement data is becoming closer and closer, leading to the growing importance of mathematical and statistical procedures. Transferring established and accepted procedures to situations with large quantities of data (e.g. by means of simulations) and long computing times (e.g. due to demanding models) is a huge challenge. Scalable mathematical and statistical tools must therefore be developed to act as complements to established procedures in order to enable a smooth transition between small and large quantities of data.

One possibility here is **dimensionality reduction**, where the structures existing in the data are exploited in a targeted manner to reduce the amount of data whilst maintaining the same content in terms of information. In this context, deep knowledge of the measurement is just as indispensable as the joint development of more efficient measurement procedures and evaluation methods. This requires collaboration between the “Mathematical Modelling and Data Analysis” department and the experimental departments in joint research projects. In numerous applications, new computer-aided measurement procedures in the “Photometry and Applied Radiometry” department have led to considerable quantities of data in calibration, as is the case, e.g., in the metrological detection of the so-called “radiating body” of a light source, where a single measurement generates approx. 100 GB of measurement data. Extensions of the basic measurement procedures, which additionally enable spectrally resolved measurements, are expected for the near future; they will result

in another considerable increase in the amount of data. The German Council of Science and Humanities also considers that there is a significant need for research in this field:

“The measurements generate huge quantities of multidimensional data; it is, however, not certain what processable information can be derived from them. It would be helpful to intensify the research efforts with regard to data interpretation and data use.”

**German Council of Science
and Humanities, 2017**

In applications where it does not make sense to reduce data dimensionality due to the applications aimed at, practicable and reliable methods must be developed for the **transfer of large amounts of data**. The problem is not so much the data storage or the data transmission speed, but rather finding a suitable data format. At PTB, for example, traceable measurements of reflection standards are supplied, as needed by a number of device developers and calibration and testing laboratories. Here, a uniform, standardized data format is necessary for measurements of the bi-directional reflectance distribution function of surfaces; this format must be able to image the high-dimensional, complex data, including the measurement uncertainties and the information about the surface suitably and to allow reliable data analysis. Thereby, a flawless computer-aided interpretation of the data must be ensured. Based on the measuring infrastructure and on experience of the “Imaging and Wave Optics” department as well as on its long-standing, successful cooperation with the “Mathematical Modelling and Data Analysis” department, it is possible to develop adequate data formats and analytical methods for this purpose.

Data mining methods and other correlation procedures are widely used methods in areas such as real-time analysis in “Industrie 4.0”. Thereby, sensor data are continuously evaluated and compared with each other. In metrology, an example of this is the **data correlation analysis** of photovoltaic modules along their value chain. By developing adequate measurement and traceability methods, data analysis procedures can be developed which would, for example, enable an early reaction in the event of a fault and allow a link to be established between lower efficiency in a solar park and wafer production, for example. Since this presupposes profound knowledge and developments with regard to the measurement procedures as well as the development of suitable mathematical and statistical procedures, here again, joint research of the “Photometry and Applied Radiometry” and “Mathematical Modelling and Data Analysis” departments is necessary.

Examples of high-dimensional measurement results are also encountered in many fields of nanometrology, like signal contrast modelling by means of Monte Carlo methods for the evaluation of measurements on nano-objects in scanning electron microscopes. Furthermore, imaging procedures generating large amounts of data, which also have to be processed, are increasingly used in dimensional metrology and optical surface metrology. Determining the influences of uncertainty in these fields is sometimes only possible by means of demanding **simulation calculations**. As a rule, these require dimensionality reduction to facilitate the handling of the data. Similar approaches are increasingly applied in the field of production where, e.g., optical measurement methods are used. This requires the development of methods allowing statements about the quality of the measurement uncertainty when using dimension-reducing procedures. Thereby, generic procedures must always be developed based on concrete applications, and thus in cooperation with the elaboration of the measurement procedure. By selecting the measurement points adequately, adapted measurement procedures can even lead to a sufficient dimensionality reduction.

In research, a rapidly growing number of publications is observed in the field of big data analysis and automated **big data** analysis, due to, e.g., machine learning and artificial neural networks [11, 49]. Currently developed methods are usually based on the established theory of artificial neural networks, but use an increasing number of hidden layers between the input and the output [11]. These methods are generally designated as “**deep learning**”. Due to the increasing availability of specialized hardware, of open-source software and of very large amounts of data, “deep learning” methods are becoming relevant in a growing number of fields [40]. From the quality infrastructure viewpoint – and especially from the viewpoint of metrology – the aspect of the reliability of the results is highly relevant. Such data analysis procedures have, however, not yet been dealt with from a metrology point of view. Investigating the reliability of data analysis and developing methods for the quantitative evaluation of the results’ quality are subjects that are currently being dealt with in research, outside metrology as well, for instance at the Fraunhofer Institute for Telecommunications, Heinrich Hertz Institute (HHI) in Berlin [51]. As a general rule, the development of methods for the determination of uncertainties and statements about the quality in “deep learning” is, however, still in its infancy. In critical areas, there is the additional issue of the susceptibility to the manipulation of results of machine learning by tampering with the input data. This field of research is called “adversarial learning” [52] and will be relevant for metrology in the future.

Metrology of the communication systems for digitalization

The availability of reliable, efficient and flexible communication channels is a frequently mentioned prerequisite for successful digital transformation, see for example [38]. The expansion of **5G technology** is being intensively pushed forwards, in particular. The Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (VDE – Association for Electrical, Electronic & Information Technologies) thus quotes experts from these sectors as considering a roll-out of 5G in Germany as realistic even before 2020 [53]. In their analysis “Key Issues for Digital Transformation in the G20”, the G20 have also emphasized the need for a fast expansion of 5G by means of targeted public promotion and have even recommended that the roll-out goal be fixed for 2018 [39]. Currently, the term “5G technology” usually designates radiofrequency communication technologies in the upper megahertz or in the gigahertz frequency range. There is no final 5G standard at present, which means that it is not certain yet what concrete requirements must be met. The “Next Generation Mobile Networks Alliance”, for instance, defines the requirements placed on a 5G standard as follows: the availability of very high data rates (from 100 Mbit/s to 1 Gbit/s), even for large groups of simultaneous users; several hundreds of thousands of simultaneous wireless connections; a considerably more efficient exploitation of the spectral range as compared to 4G; considerably lower latency as compared to LTE, and enhanced transmission efficiency [38].

“5G will operate in a highly heterogeneous environment characterized by the existence of multiple types of access technologies, multi-layer networks, multiple types of devices, multiple types of user interactions, etc.”

NGMN White Paper 5G

As a rule, in 5G communication and digital modulation, the **high-frequency measurands** are very complex, nonlinear, stochastic and high-dimensional. For instance, quadrature amplitude modulation (QAM) with large numbers of constellations (64 – 4096) is playing an enhanced role in high-frequency communication engineering. The required transmission and reception techniques must be characterized with great accuracy in order to minimize transmission errors. An efficient use of the electromagnetic spectrum in terms of range, channel capacity and channel density thus requires nonlinear and stochastic characteristics in the spectral range (harmonic content, signal-to-noise interval, degree of passive intermodulation, oscillator phase noise, etc.) to be known. Traceable

measurements of these nonlinear and stochastic measurands are therefore the precondition for the **calibration of high-frequency measuring instruments** and for the setting up/development of digital communication systems.

Traceability has, to date, nearly only been available for basic measurands (unmodulated continuous-wave signals, linear characterization), although commercial devices for nonlinear characteristics have also been developed in Germany. Including such measuring instruments into the calibration hierarchy would provide the relevant companies with a significant competitive advantage. The need for an extension of the accreditation scope of the DAkkS laboratories to nonlinear and stochastic measurands is therefore increasing due to digitalization. According to the calibration hierarchy, however, the precondition for this is the traceability of such measurands at PTB.

Furthermore, antenna arrays with MIMO technology (multiple input multiple output) up into the millimetre wave range [54] are playing an important role in antenna measuring techniques due to the transformation into 5G networks. Ensuring the reliability of such systems requires the emitting and receiving technique used to be metrologically characterized and the measuring instruments used for characterization to be traceably calibrated. For instance, it is necessary to investigate the technical implementation of the signal focusing of time-varying channels at the most diverse frequencies and propagation conditions (massive MIMO).

Developments towards self-configuring, intelligent systems with great requirements being placed on the interoperability in highly complex communication protocols are leading to the need for the traceability of signal parameters such as the modulation level and modulation deviation, the error vector magnitude (EVM) and the error rates (modulation/bit/frame error rate). In order to develop the measuring equipment and antenna systems correspondingly, it is necessary to know the channel runtimes, the channel transmission loss and the pulse drift of every individual propagation channel exactly. The availability of corresponding metrological services in Germany would represent a competitive advantage in a market that is currently still dominated by the USA and China. Preliminary work done by PTB in this area concern the THz Communication Lab, EVM measurements by means of digital real-time oscilloscopes, the calibration of vector signal analysers, the measurement of electrically transformed optical **modulation characteristics**, and first activities on the characterization of “smart antennas”.

Other institutes such as NIST have long acknowledged the required research effort and

have massively invested (approx. 300 million US dollars) into the “Communications Technology Lab” and into the “**mmWave, 5G & beyond**” research programme [55]. NIST’s activities are scheduled to take at least 20 years of research. NPL is also massively developing its research activities in this field and has just founded the “Nonlinear Microwave Measurements and Modelling Laboratories” joint research centre with the University of Surrey².

Metrology for simulations and virtual measuring instruments

In several application fields of metrology, simulations and virtual experiments have already been established for some time. In **coordinate metrology** for example, simulation-based measurement uncertainty determination is covered by ISO 15530-4 for well-defined measurement tasks [56]. With the “**Virtual Coordinate Measuring Machine VCMM**”, an evaluation software program for coordinate measuring instruments, PTB has a reference procedure at its disposal which it developed itself and which large manufacturing companies such as Zeiss and Hexagon have implemented in their coordinate measuring instruments and which has also already been transferred to DAkkS calibration laboratories [57]. The measurement data are evaluated automatically, and the measurement uncertainties are also determined automatically, efficiently and with digital interfaces for further processing inside the connected infrastructure. PTB, being independent of manufacturers and enjoying a leading position as a trustworthy institute throughout the world when it comes to developing simulation-based evaluation software for measurement uncertainty determination, can rely on ideal conditions for further developing the application possibilities. The final objective is to transfer the method used for the VCMM to all relevant classes of measuring instruments that are relevant in production in order to provide valid statements concerning the measurement uncertainties obtained with the measuring instruments and sensors used in the production industry pursuant to “Industrie 4.0”. In this context too, strategic cooperation is envisaged between the “Coordinate Metrology” department and the “Mathematical Modelling and Data Analysis” department in order to push forwards the development of generic methods for the simulation-based evaluation of measurement data. In the field of optical measurement procedures, PTB has the ideal preconditions for the development of a holistic simulation tool for optical form measuring devices [58]. These preconditions take the form of PTB’s worldwide leading position in optical, two-dimensional asphere technology

¹ <http://www.tcl.tu-bs.de/>

² <http://n3m-labs.org>

and its simulation tool “**SimOptDevice**”, which has already been successfully used in numerous research projects; this tool is used for optical ray tracing taking static mechanical influences into account. In principle, the modular setup and the availability of the software sources allow the wide use of this tool for virtual experiments inside PTB. Certain measurement procedures must even categorically be based on a physically correct simulation. The “**tilted wave interferometer**”, which was developed at the University of Stuttgart and has also been operated at PTB for asphere metrology, uses a simulation of the beam path to determine the deviation of the object under test from a digitally determined design template [59, 60]. Hereby, the virtual measurement result obtained by means of the simulation is compared with the actual result in order to obtain the actual surface structure of the object under test from these deviations. One of the greatest challenges of such experiments is to ensure traceability to the SI units. Due to the complexity of the physical setup and of the simulation procedures used, there is a significant need for research in this area. Algorithms are also increasingly being used to acquire and exploit data from integrated connected measuring systems of quality monitoring and **automated production control**, for example in the integration of methods of additive manufacturing in the production industry, the objective being to increase efficiency and to maintain competitiveness. This results in new tasks for traceability and measurement uncertainty influences of integrated connected measuring systems, among other things by developing standards for use in application-oriented measurement and control. Especially **additive manufacturing procedures** are becoming increasingly used as a complement to established methods in the industrial environment – for example in order to increase efficiency. Due to their layer-like manufacturing characteristics, such procedures offer good leeway for more freedom in the design and for optimization according to different criteria. The development of appropriate “in-process measurement procedures” to control additive manufacturing and the metrological characterization of the manufacturing precision, however, represent huge challenges. PTB is currently investing in corresponding production facilities – for one thing for efficient and more flexible manufacturing in PTB’s own “Scientific Instrumentation” department, for another for the realization of metrological research projects. Initial research activities at PTB have already been realized within the scope of the “Traceable in-process dimensional measurements” research project which was funded by the EU and was completed in 2016. As a consequence of the connected measuring systems, the customers of sensor manufacturers

are increasingly asking for **intelligent measuring systems** which – when equipped with the necessary software – generate results automatically and partly autonomously, and can interact with other sensors and facilities (purchasing measurement values rather than measuring instruments). The further increasing need for accuracy and reliability of the measurement results leads to a growing number of measuring instruments having to be calibrated with digital interfaces and integrated evaluation software (e.g. in acoustics and dynamic applications). The measuring equipment and measurement procedures available at metrology institutes to date are not normally equipped to examine measuring instruments in which the indicated value has already been pre-processed. This presents NMIs with new challenges, especially when neither the evaluation algorithms, nor the analogous raw data can be directly retrieved. Here, both new measuring capabilities and novel approaches of conformity evaluation are becoming necessary.

Technological infrastructure

The new sets of tasks identified for PTB for the major part presuppose a change in the IT infrastructure. For instance, the planned creation of a “metrology cloud” requires **efficient server systems** with very high IT security and continuous maintenance in order to sustain the existing confidence in PTB as a “trustworthy core” within the concept. The same is true of the digital calibration certificate concept and of the digital interfaces to reference data of PTB.

In order to set up an electronic document filing system, as required by the digital transformation, PTB has already started preparing for the introduction of an **e-file** system. The planned document administration makes a central, server-based administration of internal documents available which encompasses cooperative working, digital signatures, access control and archiving methods. For this purpose, the workflow for all of PTB’s internal document-based business processes has been adapted to the e-filing system by an interdisciplinary organization working group. Initial internal pilot projects are expected to start at the beginning of 2018 with a progressive roll-out until approx. the end of 2020. The planned concepts of a digital calibration certificate and of digital customer interfaces are already to be taken into consideration for the required process structure to ensure that the systems are compatible.

Analysing large amounts of data and dealing with high-dimensional mathematical and statistical issues require an adequate **IT service for computationally intensive processes**. In this context, it is necessary to be able to offer high-per-

formance computing (HPC) solutions available across the borders of divisions and departments, parallel computing, high-availability scalable storage and special IT services. If these technologies are developed sustainably, this could be realized for specialized services by developing internal pricing schemes. The Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM) is currently also elaborating such a concept. PTB and BAM have already started exchanging information and experiences, and it is planned to pursue this exchange in the future. At NIST in the USA, there is already an internal range of IT services for the **cloud-based storage** and archiving of publically accessible research data; these services are based on an internal pricing scheme. NIST's experience has, however, shown that the prerequisites for such services to actually be used are access to the services being as simple as possible and a good cost/benefit ratio. This can be realized for example by establishing capabilities in the development of software in order to centralize the work done to develop interfaces to data, databases and parallel computing, and the standardization of the software libraries for scientific cross-sectional tasks. At the national level, there are currently several initiatives (such as that of the German National Research and Education Network – Deutsches Forschungsnetzwerk (DFN)) aiming to develop cloud infrastructures in the form of “infrastructure as a service” (IaaS) and to make them centrally available [61]. PTB could immensely benefit from such structures in the form of basic agreements. What IaaS offers, however, does not replace the necessity to develop software interfaces and to service them in the long term. Otherwise, the services purchased cannot be exploited to the full, since the technological requirements for their profitable utilization are comparably high.

In addition to the performance of the computing systems and their storage capacity, a sustainable and uniform **research data management** concept is considered a “condition for excellent research” (German Rectors' Conference; an association of universities in Germany). Correspondingly, there are a growing number of promotion initiatives, such as that of the BMBF for research and the elaboration of solutions to the challenges of research data management. In addition, the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) at the national level and the European Commission are elaborating specifications to oblige funded projects to make the research data obtained within the scope of the projects publicly available. At the European level, the **European Open Science Cloud** initiative is the start of a ground-breaking advance towards a harmonized European research data landscape. The competent committee's recommendation therefore reads: “We recommend that use of present and

future instruments in research programming, including Horizon 2020, should only support projects that properly address data stewardship issues for open data.” An efficient infrastructure for the handling of research data will thus become indispensable in the near future for PTB as an important project partner in numerous Horizon 2020 projects. Corresponding internal preliminary talks on this subject have already begun. Thereby, the first requirements identified were that centralized IT services should be made available to ensure the security of research data in the long term; moreover flexible access (for persons or groups of persons) to data should be granted and interfaces for external access to appropriate data should be enabled.

“Against the background of the increasing data intensity of science, data curation – as a prerequisite for the later re-use of the data – is rapidly gaining in importance.”

Council for Scientific Information Infrastructures, 2016

One of the goals of the European initiatives is to document data and to make them findable. One of the essential prerequisite for this is to have **harmonized metadata structures** and data standards. At the national level, the **GovData** initiative, which aims to define a uniform format for public administrative data, represents the first step in that direction. In the meantime, various kinds of data formats and metadata structures have become available. It is, in part, possible to develop automated procedures to generate so-called “rich metadata” – for example based on well-defined processes concerning the generation of the data. This, however, usually represents a continuous task for

“highly qualified staff with both technical and IT skills to ensure the interoperability of the datasets inside a repository. These criteria cannot be met by the mere depositing of uncurated data by researchers, which reduces the value creation potential within the life cycle of the data”

Council for Scientific Information Infrastructures, 2016

References

- [1] *Digitalisierung*, [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Digitalisierung>. [Last accessed: 29.3.2017].
- [2] RfII – Rat für Informationsinfrastrukturen: *Leistung aus Vielfalt. Empfehlungen zu Strukturen, Prozessen und Finanzierung des Forschungsdatenmanagements in Deutschland*, Göttingen, 2016.
- [3] BITKOM, *Industrie 4.0 – Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland*, Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V., Berlin, 2014.
- [4] F. Thiel and M. Esche: *Digitalisierung im gesetzlichen Messwesen*, PTB-Mitteilungen, No. 4, 2016.
- [5] D. Schaudel: *Sensor 4.0 für Industrie 4.0*, 12th Dresdner Sensor Symposium, 2015.
- [6] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: *Smart Data – Innovation aus Daten*, 2016.
- [7] BITKOM: *Big Data im Praxiseinsatz – Szenarien, Beispiele, Effekte*, 2012.
- [8] McKinsey Global Institute: *The internet of things: mapping the value beyond the hype*, 2015.
- [9] G. P. Sullivan, R. Pugh, A. P. Melendez and W. D. Hunt: *Operations & Maintenance Best Practices: A Guide to Achieving Operational Efficiency*, Pacific Northwest National Laboratory, U. S. Department of Energy, 2010.
- [10] pwc: *Industry 4.0: Building the digital enterprise*, Global Industry 4.0 Survey, 2016.
- [11] Yann LeCun: *Deep Learning*, Nature, vol. 521, pp. 436–444, 2015.
- [12] C. Eckert: *IT-Sicherheit und Industrie 4.0*“ IM+io, Fachzeitschrift für Innovation, Organisation und Management, No. 1, 2014.
- [13] VDE Cybersecurity: *Funktionale Sicherheit und Informationssicherheit in Zeiten von Industrie 4.0 und Smart Home*, [Online]. Available: http://conference.vde.com/fs/2017/Documents/Nachberichterstattung_Funktionale%20Sicherheit%20und%20Informationssicherheit%20in%20Zeiten%20von%20Industrie%204.pdf. [Last accessed: 15.1.2018].
- [14] M. Vickers: *Calibration Lab Vectors of Vulnerability*, CAL LAB: THE INTERNATIONAL JOURNAL OF METROLOGY, p. 40, September 2016.
- [15] U. Grottker and R. Meyer: *Konfigurationsanforderungen an Betriebssysteme*, Metrologische IT, vol. 4, PTB-Mitteilungen, 2016, pp 33–43.
- [16] VDMA: *IMPULS – Digital vernetztes Denken in der Produktion*, 2016.
- [17] Optech Consulting: *Industry Report of Photonic 2013*, [Online]. Available: <http://www.spectaris.de/photonic-praezisionstechnik/presse/artikel/seite/branchenreportphotonik-2013-wirtschaftsdaten-einer-schlusselftechnologie/presse-1.html>. [Last accessed: 26.6.2017].
- [18] BMBF Photonik Forschung Deutschland: *2020 Agenda Photonik*, VDI Technologiezentrum, 2016.
- [19] N. Leffler and F. Thiel: *Im Geschäftsverkehr das richtige Maß – Das neue Mess- und Eichgesetz*, Schlaglichter der Wirtschaftspolitik, 2013.
- [20] BMJV: *Gesetz über das Inverkehrbringen und die Bereitstellung von Messgeräten auf dem Markt, ihre Verwendung und Eichung sowie über Fertigpackungen*, [Online]. Available: <http://www.gesetze-im-internet.de/messeg/index.html>. [Last accessed: 30.3.2017].
- [21] BMJV: *Verordnung über das Inverkehrbringen und die Bereitstellung von Messgeräten auf dem Markt sowie über ihre Verwendung und Eichung*, [Online]. Available: <http://www.gesetze-im-internet.de/messev/index.html>. [Last accessed: 30.3.2017].
- [22] European Commission, CEN, CENELEC, ETSI: *New Approach Standardisation in the Internal Market*, [Online]. Available: <http://www.newapproach.org>. [Last accessed: 29.3.2017].
- [23] Plattform Industrie 4.0: *Landkarte Industrie 4.0*, [Online]. Available: <http://www.plattform-i40.de/I40/Navigation/DE/In-der-Praxis/Karte/karte.html>. [Last accessed: 29.3.2017].
- [24] atos: *Journey 2020 – Digital Shockwaves in Business*, 2017.

- [25] BMWi, BMBF, *Plattform Industrie 4.0*, [Online]. Available: <http://www.plattform-i40.de>. [Last accessed: 29.3.2017].
- [26] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, *Monitoring-Report Wirtschaft DIGITAL 2016*, 2016.
- [27] Plattform Industrie 4.0, *Labs Networks Industrie 4.0*, [Online]. Available: <http://lni40.de>.
- [28] BMWi, “Mittelstand 4.0”, [Online]. Available: <http://www.mittelstand-digital.de/DE/Foerder-initiativen/mittelstand-4-0.html>. [Last accessed: 29.3.2017].
- [29] DKE, VDE, DIN, *Standardization Council Industrie 4.0*, [Online]. Available: <http://sci40.de>. [Last accessed: 29.3.2017].
- [30] European Commission, *Digital Single Market*, [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/policies/shaping-digital-single-market>. [Last accessed: 15.1.2018].
- [31] BMBF, *Horizon 2020*, [Online]. Available: <http://www.horizont2020.de>. [Last accessed: 29.3.2017].
- [32] EFRA, *European Factories of the Future Research Association*, [Online]. Available: <http://www.effra.eu>. [Last accessed: 29.3.2017].
- [33] European Commission, *Realising the European Open Science Cloud*, 2017.
- [34] Finanzbehörde Geschäfts- und Koordinierungsstelle GovData, *GovData – Das Datenportal für Deutschland*, [Online]. Available: <http://www.govdata.de>. [Last accessed: 29.3.2017].
- [35] Physikalisch-Technische Bundesanstalt, *Metrologische IT*, vol. 4, Braunschweig: PTB-Mitteilungen, 2016.
- [36] NIST, *US Government Cloud Computing Technology Roadmap*, vol. I & II, 2014.
- [37] BMWi, *Leitplanken digitaler Souveränität*, Nationaler IT-Gipfel, 2015.
- [38] ngnm, *NGNM 5G White Paper*, 2015.
- [39] OECD, *Key issues for digital transformation in the G20*, 2017.
- [40] IEC, *IoT 2020: Smart and secure IoT platform*, International Electrotechnical Commission, 2016.
- [41] DIN, EN, ISO, IEC 17025:2005-08 *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*.
- [42] NIST, *Big Data Interoperability Framework – NIST SP 1500*, NIST Special Publication, 2015.
- [43] R. Hanisch, *International Metrology Resource Registry*, Sèvres: NIST, 2016.
- [44] NIST, *Units Markup Language (UnitsML)*, [Online]. Available: <http://unitsml.nist.gov>. [Last accessed: 29.3.2017].
- [45] TraCIM e. V., *TraCIM Service*, [Online]. Available: <https://tracim.ptb.de/tracim/index.jsf>. [Last accessed: 29.3.2017].
- [46] Intelligente Technische Systeme OstWestfalen-Lippe (it's owl), *Auf dem Weg zu Industrie 4.0 – Erfolgsfaktor Referenzarchitektur*, it's OWL Clustermanagement GmbH, Paderborn, 2015.
- [47] V. Markl, *Breaking the Chains: On Declarative Data Analysis and Data Independence in the Big Data Era*, in *Proceedings of the VLDB Endowment*, 2014.
- [48] Fraunhofer IAIS, *Big Data – Vorsprung durch Wissen*, Sankt Augustin, 2016.
- [49] L. Wassermann, *Statistics versus Machine Learning*, [Online]. Available: <https://normaldeviate.wordpress.com/2012/06/12/statistics-versus-machine-learning-5-2/>. [Last accessed: 30.3.2017].
- [50] BITKOM, *Germany – Excellence in Big Data*, 2016.
- [51] Fraunhofer, *Dem Computer beim Denken zusehen*, Forschung kompakt, 2017.
- [52] C. M. Daniel Lowd, *Adversarial Learning*, *Proceedings of the Eleventh ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery in Data Mining*, 2005.
- [53] VDE *Umfrage: Digitale Transformation bis 2025 abgeschlossen*, [Online]. Available: <https://www.vde.com/de/presse/pressemitteilungen/mitglieds-umfrage-5g>. [Last accessed: 29.3.2017].
- [54] VDE ITG, *Intelligente Mobilfunkantennen*, *VDE ITG Positionspapier*, 2014, [Online]. Available: <https://shop.vde.com/de/vde-positions-papier-intelligente-mobilfunkantennen>.
- [55] NIST, *5G & beyond*, [Online]. Available: <https://www.nist.gov/programs-projects/5g-beyond>. [Last accessed: 29.3.2017].
- [56] ISO, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement – Part 4: Evaluating task-specific measurement uncertainty using simulation*, 2008.
- [57] Carl Zeiss GmbH, *Artifacts – Measuring machine monitoring to ensure the reliability of your measuring results*, EN 60-020-165II.
- [58] PTB, *Formmessung gekrümmter optischer Oberflächen*, [Online]. Available: <https://www.ptb.de/cms/nc/ptb/fachabteilungen/abt8/fb-84/ag-842/formmessung-8421.html#c68736>. [Last accessed: 29.3.2017].
- [59] Mahr, *Tilted Wave Interferometer zur schnellen und flexiblen Messung und Analyse asphärischer Linsen*, [Online]. Available: <https://www.mahr.com/de/Leistungen/Fertigungsmesstechnik/Produkte/MarOpto---Messgeräte-für-die-Optikindustrie/MarOpto-Tilted-Wave-Interferometer/>. [Last accessed: 29.3.2017].

- [60] PTB, *Tilted-Wave Interferometer*, [Online]. Available: <https://www.ptb.de/cms/de/ptb/fachabteilungen/abt4/fb-42/ag-421/tilted-wave-interferometer.html>. [Last accessed: 29.3.2017].
- [61] Deutsches Forschungsnetzwerk, *Material der 66. Betriebstagung*, [Online]. Available: <https://www.dfn.de/dfn-cloud/weiterentwicklung/workshop-maerz-2017/>. [Last accessed: 31.3.2017].

Mathematics and Statistics for Digitalization

Markus Bär¹ and Clemens Elster²

Abstract

Digitalization is one of the major current societal challenges and its appropriate handling will determine the future economic success of Germany and the EU. The dramatic development over recent years of computational capacities, the introduction of smart sensors and their interconnection via the Internet have enabled new technological advances that will change daily life. Future metrology faces a transition from the assessment of single measurement devices to fully connected sensor systems raising new challenges such as their calibration or uncertainty quantification. Established mathematical and statistical approaches are often no longer sufficient and need to be expanded or even replaced with new methods. This paper intends to identify and discuss the need for the development of novel methods in mathematics and statistics for metrology required to successfully deal with the challenges of digitalization over the next decades.

1 Introduction

Data analysis and mathematical procedures play a key role in today's metrology. Without the application of advanced techniques from signal processing, statistics and numerical analysis, current high-accuracy measurement results would not be possible. M. Sené, I. Gilmore and J. T. Janssen from the National Physical Laboratory (NPL) in the UK, for example, emphasize the role of advanced data analysis and related uncertainty quantification in metrology in a recent viewpoint in Nature [1]:

“Measurement technology is becoming more powerful and complex. ... Tracking and quantifying the uncertainty of the final result can get lost amid all this data crunching ... An increasing number of research areas lack a metrological framework, however ... Quantifying uncertainty in complex problems is almost becoming a field in itself. The metrology community needs to step up to this challenge, in particular by engaging more statisticians, data experts.”

¹ Prof. Dr. Markus Bär, Department “Mathematical Modelling and Data Analysis”, e-mail: markus.baer@ptb.de

² Dr. Clemens Elster, Working Group “Data Analysis and Measurement Uncertainty”, e-mail: clemens.elster@ptb.de

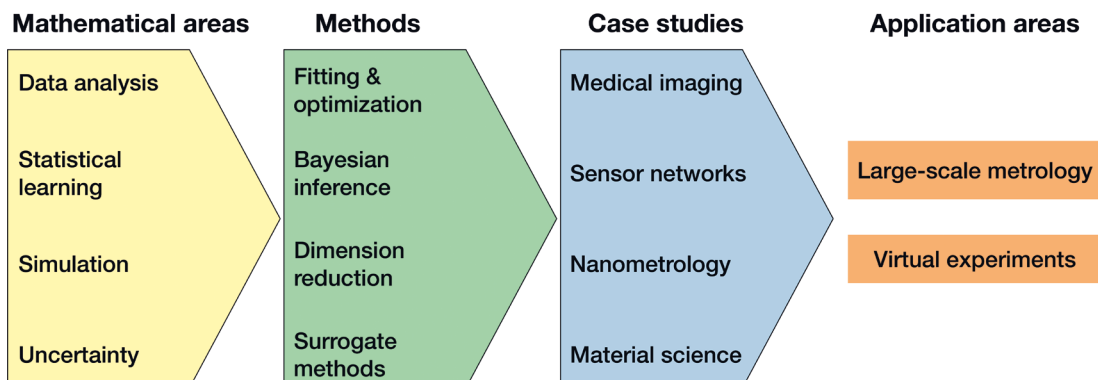


Figure 1: Impact of mathematics and statistics on digitized metrology.

Digitalization drastically boosts the importance and impact these methods have on metrology. The expertise in mathematical and computational tools will decide about the leading role in future metrology and the speed of the transition of classical metrology to digitized metrology. The impact of statistical data analysis in this transition is underlined in National Science Review [2] by J. Fan, F. Han and H. Liu, statisticians from Princeton University and Johns Hopkins University:

“Big Data bring new opportunities to modern society and challenges to data scientists ... the massive sample size and high dimensionality of Big Data introduce unique computational and statistical challenges.... Valid statistical analysis for Big Data is becoming increasingly important.”

Metrology as the science of measurement has always been, and will always be, concerned with quantitative results, including the quantification of their uncertainty. Without a reliable characterization of the measurement uncertainty, measurement results cannot be traced back to the basic units of measurement, a key mission of any National Metrology Institute (NMI). While uncertainty quantification is well understood for conventional metrology, corresponding concepts are lacking for some of the tasks faced in digitized metrology. Examples comprise the uncertainty associated with a sensor network or an empirical model built from a huge amount of data by machine learning techniques. The development of novel methods for uncertainty evaluation therefore is a major challenge for the successful handling of digitalization.

Digitalization will significantly intensify the need for large-scale metrology, i.e. metrology that is concerned with measurands consisting of a large, or even a huge, number of quantities (10^5 or more, say). Sensor networks are just one example, but also for conventional metrology this issue is becoming increasingly relevant, e.g. within dynamic metrology, where the goal is the determination of a whole function such as a time-dependent dynamic force in a crash test, or when characterizing spectral properties in photometry. Metrology is also turning, more and more, towards emerging fields such as health metrology, where imaging methods are often developed into quantitative tools, or nanometrology, where the ever-improving spatial resolution of measurement techniques provides high-dimensional sets of data. Currently, the relevant tasks are solved only approximately, for example by ignoring the presence of correlation in the results. This is because current computational techniques cannot successfully deal with full covariance matrices of such high dimensions.

Modern computer capacities have strongly enhanced the use of **virtual experiments**. Virtual

experiments allow the cheap and comprehensive exploration of complex measurement devices. They are particularly suitable when designing such devices. Today, virtual experiments have also become an integral part of measurement devices, used in the analysis of the recorded data. Typically, virtual experiments produce huge amounts of data, and often the modelling of the physical principles is computationally expensive. Issues of large-scale metrology therefore enter the analysis of virtual experiments, as well as surrogate modelling for the approximate, numerically efficient representation of the results of a virtual experiment.

Digitalization leads to a rapid increase of situations where huge amounts of data are produced that shall be used for modelling, prediction and control. Examples comprise such different applications as health monitoring from various modalities or process control via large amounts of interacting sensors in industrial facilities. In order to retrieve the relevant information from such unstructured data, methods from **machine learning** are used for empirical model building and decision-making. Challenges for metrology are that these methods need to be accompanied with an uncertainty quantification. Furthermore, when such methods become an integral part of novel measurement systems, reference procedures and reference data need to be developed to properly assess them.

Statistical process control applies statistical procedures to monitor processes and immediately detect when these processes no longer follow intended specifications. Digitalization poses challenges for these established techniques, and current tools may no longer be applicable. Legal metrology is one field where digitalization can lead to a huge impact of techniques from statistical process control.

In the following, these different challenges in mathematics, statistics and numerical computation are illustrated and discussed.

2 Large-scale metrology

Large-scale metrology is concerned with measurands that consist of large, or even huge, numbers of quantities to be determined simultaneously from measured data. Examples comprise applications in conventional metrology such as dynamic measurements, nanometrology or photometry, where either a whole function is to be determined or large numbers of quantities (10^5 or more). The sheer amount of variables and measured data can already prohibit the estimation and handling of covariance matrices by conventional means. Another challenge is that current computational tools for nonlinear regression problems such as least-squares fitting or state-of-the-art Monte Carlo techniques in statistics do not scale well to dimensions significantly larger

than 10^4 . New statistical methods and computational tools are needed to extend today's metrology to large-scale measurement systems, and their development represents current frontiers in statistical research [3–11].

So far, large-scale metrology has been constrained to a few special areas within metrology such as coordinate measurement techniques. In mainstream metrology, major tasks are still dominated by single device systems and the presence of a small number of quantities, or even of a single quantity, that constitutes the measurand [12]. However, digitalization will drastically change this situation and force metrology to successfully deal with large-scale metrology. Sensor networks (e.g. for environmental monitoring with high spatial and temporal resolution) are just one example that emerges from the new possibilities that digitalization creates. The transition to digitized metrology will move issues of large-scale metrology from the edge to the centre of modern metrology, and all the mathematical and statistical challenges faced for large-scale metrology need to be properly addressed.

3 Virtual experiments

The development of modern computer capacities allows the implementation of virtual experiments that capture the features of complex measurement devices in a realistic way. Virtual experiments enable the comprehensive exploration of possibilities and limitations without the need for carrying out real experiments, thereby providing a cheap way to optimally design new measurement devices. PTB has, for example, developed SimOptDevice, a flexible tool for designing and running virtual experiments for optical form measurements [13, 14] that has proven essential in several industrial projects.

Virtual experiments have meanwhile also become an integral part of novel measurement devices. For example, the tilted-wave interferometer [13] is actually based on a virtual experiment. The tendency of virtual experiments to become a part of measurement devices is growing, and when interconnecting a large number of smart sensors and measurement devices, at least some of them can be expected to depend on a virtual experiment. Metrology is faced with questions such as how to calibrate virtual experiments or the way an uncertainty is assigned to their outputs. At the same time, it can be expected that such questions will often need to be addressed in an online fashion.

Nowadays computational advances also allow the realistic modelling and simulation of measurement processes when the governing physical laws are well understood and easily cast in the form of basic equations such as the Navier-Stokes equations and their variants in flow metrology, or the Maxwell equations in many applications in optics

and electromagnetic scattering. Numerical tools such as the finite-element method are applied to explore the behaviour of a measurement device including the object under study. The employed algorithms, however, often produce a large amount of data points in order to adequately reproduce the corresponding continuum functions representing, e.g. flow or electric fields, see e.g. [15, 16].

The mathematical and statistical challenges are then similar to those of large-scale metrology. However, in some cases, virtual experiments are still computationally too expensive, and tools from surrogate modelling are needed. These methods are particularly important for adequate uncertainty characterization in measurements where the relationship between the variables is governed by partial differential equations. Metamodelling techniques use values of a computationally expensive model to determine a computationally cheap surrogate model, which then allows statistical analyses, including uncertainty quantification, to be performed that would have been intractable otherwise.

4 Statistical monitoring and process control

Statistical process control comprises well-established statistical techniques for the control and monitoring of processes [17]. Control charts such as multivariate Shewhart charts are routinely applied nowadays to detect the onset of instabilities. Digitalization poses challenges for these established techniques, for example, when decisions need to be made in view of huge amounts of unstructured data for which current control charts are no longer applicable. Legal metrology is another field in which statistical monitoring can become an important tool. While today conformity assessment is usually done by checking a single device, or a sample of devices (drawn randomly from a large population of devices), digitalization may enable conformity assessments to be made online, and for whole populations of devices at the same time. Proceeding in such a way will result in huge savings. And it will also improve the desired quality assurance significantly as all devices may undergo an ongoing, permanent conformity assessment check. However, in order to meet the specific legal requirements through online statistical quality assurance, corresponding statistical procedures need to be developed which optimally address the specific legal requirements. This in turn calls for individual solutions in different fields due to their different requirements.

5 Machine learning

Machine learning refers to computer algorithms that are able to learn and to make predictions

from empirical data. It comprises a large variety of methods that describe how empirical models are extracted from data. These models are typically employed to produce reliable and repeatable decisions and to uncover hidden correlations and structures from data sets. The field has strong relations to computational statistics and statistical learning theory [18] and draws upon the theory and methods from mathematical optimization. While machine learning has been known for decades, recent developments in both computational capacities as well as methodological advances (such as deep convolutional neural networks [19]) have boosted their importance significantly, and meanwhile methods from machine learning represent the state of the art in applications such as the diagnostics of diseases based on medical imaging data or pattern recognition in language processing and computer vision [20]. The aspect of uncertainty associated with the results of methods from machine learning has recently been brought to the fore under the label of probabilistic machine learning, but is still in its infancy [21]. Methods from machine learning are expected to play a major role in future digitized metrology, and the further development of these methods, particularly focusing on issues of uncertainty quantification, represents a statistical research program that will be highly relevant for future metrology.

6 Measurement uncertainty

Comparison of measurement results, reliable decision-making and conformity assessment require the evaluation of uncertainties associated with measurement results. The ability to compare measurements made in different places and at different times underpins international metrology. The Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM [22]) provides the current state of the art for uncertainty evaluation in metrology. JRP EMRP NEW04 (08/12-07/15) [23] extended the methods of the GUM to inverse and regression problems and to computationally expensive systems.

In recent years, metrology has expanded to support new fields to address societal challenges relating to energy and sustainability, climate and environmental monitoring, life sciences and health, using measurement modalities such as imaging, spectroscopy, earth observation and sensor networks. Reliable uncertainty evaluation is particularly important in these applications, e.g. to safeguard diagnostics in medical imaging or to reliably monitor air pollution. However, due to the large numbers of unknown quantities and measured data (10^5 or larger) involved in these

applications, e.g. where a sensor network is used to measure and predict environmental quantities with high spatial and temporal resolutions, neither the GUM nor the methods developed within EMRP NEW04 are applicable.

Digitalization will substantially strengthen these developments and the need for novel uncertainty quantification methods. Furthermore, for each of the above-discussed mathematical issues that are becoming relevant in digitized metrology, i.e. large-scale metrology, virtual experiments, statistical process control and machine learning, the adequate evaluation of uncertainties associated with the results is challenging. For example, large-scale metrology is concerned with measurands of large, or even huge, dimensions which already challenges uncertainty characterizations in terms of full covariance matrices, and even more so when characterizing uncertainty through probability distributions. Characterizing the uncertainty associated with results from virtual experiments is often faced with high-dimensional quantities and computationally expensive models, and generally virtual experiments yield a necessarily imperfect image of a real process which needs to be accounted for. Finally, machine learning is usually applied for estimating model relationships or determining a classification only, without providing an uncertainty quantification associated with these results. When applied for digitized metrology, these methods need to be accompanied with an uncertainty quantification. While concepts for the evaluation of uncertainty for machine learning are an issue of current research (e.g. [21]), substantially more research is needed before these techniques can be safely applied for digitized metrology when similar demands on the quality of results shall be posed as in today's metrology.

7 Summary and conclusion

We have identified large-scale metrology, virtual experiments, statistical process control, machine learning and uncertainty quantification as key challenges for metrology in the age of digitalization. Digitalization drastically boosts the already high importance and impact mathematics and statistics have in today's metrology. Furthermore, established mathematical and statistical approaches will need to be expanded, or even be replaced, by new methods in order to successfully face the transition of classical metrology to digitized metrology. Metrology in the decades ahead will strongly depend on mathematics and statistics and their future developments.

8 References

- [1] Sené et al.: *Metrology is key to reproducing results*, Nature, 2017.
- [2] Fan et al.: *Challenges of big data analysis*, National Science Review, 2014.
- [3] Wübbeler and Elster: *A Large-Scale Optimization Method Using a Sparse Approximation of the Hessian for Magnetic Resonance Fingerprinting*, SIAM J. Imaging Sci., 2017.
- [4] Beskos et al.: *On the stability of sequential Monte Carlo methods in high dimensions*, The Annals of Applied Probability, 2014.
- [5] Blei et al.: *Variational inference: a review for statisticians*, Journal of the American Statistical Association, in press.
- [6] Braun and McAuliffe: *Variational inference for large-scale models of discrete choice*, Journal of the American Statistical Association, 2010.
- [7] Genkin et al.: *Large-scale Bayesian logistic regression for text categorization*, Technometrics, 2007.
- [8] Smith and Fahrmeir: *Spatial Bayesian variable selection with application to functional magnetic resonance imaging*, Journal of the American Statistical Association, 2007.
- [9] Guan and Stephens: *Bayesian variable selection regression for genome-wide association studies and other large-scale problems*, The Annals of Applied Statistics, 2011.
- [10] Reyes et al.: *Bilevel parameter learning for higher-order total variation regularisation models*, Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2017.
- [11] Reyes et al.: *The structure of optimal parameters for image restoration problems*, Journal of Mathematical Analysis and Applications, 2016.
- [12] Bureau International des Poids et Mesures, <http://www.bipm.org/en/about-us/>.
- [13] Fortmeier et al.: *Evaluation of absolute form measurements using a tilted-wave interferometer*, Optics Express, 2016.
- [14] Wiegmann et al.: *Accuracy evaluation for sub-aperture interferometry measurements of a synchrotron mirror using virtual experiments*, Precision Engineering, 2011.
- [15] Heidenreich et al.: *Bayesian approach to the statistical inverse problem of scatterometry: Comparison of three surrogate models*, International Journal for Uncertainty Quantification, 2015.
- [16] Schmelter et al.: *Numerical prediction of the influence of uncertain inflow conditions in pipes by polynomial chaos*, International Journal for Computational Fluid Dynamics, 2015.
- [17] Bersimis et al.: *Multivariate statistical process control charts: an overview*, Quality and Reliability Engineering International, 2007.
- [18] Hastie et al.: *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference and Prediction*, Springer-Verlag, New York, 2009.
- [19] LeCun et al.: *Deep learning*, Nature, 2015.
- [20] Jordan and Mitchell: *Machine learning: Trends, perspectives and prospects*, Science, 2015.
- [21] Gal and Ghahramani: *Dropout as a Bayesian approximation: Representing model uncertainty in deep learning*, International Conference on Machine Learning, 2016.
- [22] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML: *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*, Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM 100, 2008.
- [23] EMRP NEW04: *Novel mathematical and statistical approaches to uncertainty evaluation*. <https://www.ptb.de/emrp/new04-home.html>.

The Digital Calibration Certificate

Siegfried Hackel¹, Frank Härtig², Julia Hornig³, Thomas Wiedenhöfer⁴

Abstract

A digital calibration certificate (DCC) serves for the electronic storage, the authenticated, encrypted and signed transmission and the uniform interpretation of calibration results. Under the leadership of the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), a concept is being developed that will allow these data to be handled in the future. The target group are all facilities worldwide, which need proof of the metrological traceability of their measurement results. These include metrology institutes and designated institutes, national calibration offices, calibration laboratories and many facilities in industry that require proof of their quality management systems.

The analogue calibration certificate has so far rarely generated a surplus value for a company since the data obtained during the calibration are time-consuming and error-prone. The DCC compensates for this crucial disadvantage of its analogue counterpart. Thanks to its machine readability, digitally supported production and quality monitoring processes are greatly supported. This creates a crucial added value for a company that uses the DCC.

In addition to the structure of the DCC, special framework conditions must be laid down for its transfer. These include cryptographic protection procedures. They ensure the electronic transmission of the contents as well as the integrity and authenticity of the contents of the DCC. The core competency for appropriate procedures is

not in the field of metrology institutes. For this purpose, previous results and external expertise will be used. However, the framework conditions are defined by the metrology institutes, taking legal requirements into consideration.

The aim is to create an internationally recognized DCC format. This is to be established as an exchange format in the entire field of metrology. Based on the DCC, exchange formats should be developed in legal metrology, for digital type examination certificates and for the “digital twin” (DT), see Chapter 5.

1 Introduction

The calibration of measuring instruments is an essential pillar for correct and comparable measurements and manufacturing in industry. Without this, it is not possible to make profound statements about the quality of a manufactured product. Table 1 gives a hierarchical overview of the calibration certificates provided in Germany.

The calibration certificate has been used for many decades to verify the calibration of a measuring instrument. It is issued by PTB and by the Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS) to accredited calibrating laboratories. DAkkS is the national accreditation body of Germany.

The structural design of the DCC is of fundamental importance. PTB [1, 2] and

¹ Dr. Siegfried Hackel, Area 1.01, e-mail: siegfried.hackel@ptb.de

² Prof. h. c. Dr.-Ing. Frank Härtig, Division 1, e-mail: frank.haertig@ptb.de

³ Dr.-Ing. Julia Hornig, Department 1.2, e-mail: julia.hornig@ptb.de

⁴ Thomas Wiedenhöfer, Division 1, e-mail: thomas.wiedenhoef@ptb.de

Calibration institute	Standard type	Calibrations per year
PTB	National standard	≈ 10 000
Accredited calibration laboratory	Reference standards	Some 100 000
Internal calibration laboratory	Working standards and factory standards	Many millions

Table 1: Hierarchical overview of the calibration certificates provided in Germany.

DAkkS [3] have issued corresponding regulations. General information, such as for example the calibrating object, is shown in a strongly regulated form. This creates a uniform basis, which can be managed by the national calibration offices. In contrast, the measuring results concern only special professional groups. These often have individual data exchange formats that have established themselves in the market and should therefore be retained (e.g., [4]). Essentially, the structural design of a DCC is a technical question which is coming under the responsibility of metrology institutes for the first time.

2 Basic norms and standards

The goal is to create an internationally recognized DCC format. The format should be set up in the whole area of metrology as an exchange format. It should then be valid for the digital twin (see Chapter 5) as well as in legal metrology and should then be used for digital type examination certificates.

2.1 Metrological norms

As with its analogue counterpart, the following norms and guidance notes are also applicable to the DCC:

- the SI units [5],
- the International vocabulary of metrology (VIM) [6],
- the GUM [7],
- the CODATA table: [8]; its review: [9], and
- ISO/IEC 17025 [10].

The development of the DCC has taken account of the fact that new versions of SI [11] and ISO/IEC 17025 [12] are pending. It is crucial that all specifications in the DCC have to be made according to these regulations.

2.2 XML as a data exchange format

The DCC is provided in the Extensible Markup Language (XML). XML was developed by the World Wide Web Consortium (W3C) and was published on the web [13]. It has established itself internationally as a data exchange format. Cryptographic methods can be robustly applied to XML-based data structures [14, 15]. Further information about XML is to be found, e.g., under [16, 17]. There is already a very developed approach for data exchange from the VDI / VDE [4].

A major advantage of XML is its machine readability. In addition, XML is also basically readable

for a human being. It is also very important that XML is a long-term storage data format. This is of importance because the files must still be readable in several decades. For further information on long-term storage data formats, see [14, 18].

IEC TS 6270 “Identification of units of measurement for computer-based processing” [19] shows the handling of the SI units and derived units in XML. They can be found in the Common Data Directory on the IEC website [20].

2.3 Cryptographic protection methods

On the one hand, the integrity and authenticity of the data must be respected for a DCC. On the other hand, electronically stored data can easily be changed and copied as desired. Therefore, the use of cryptographic protection methods for the DCC is necessary. A good summary of cryptography can be found in [21].

In Germany, there has been legal regulation and related instruments for this purpose for many years. The use of qualified electronic signatures (QeS) and time stamps according to Germany’s electronic signature law (SigG) [22] and its signature ordinance (SigV) [23] have ensured that integrity and authenticity are preserved. Documents bearing a QeS are to be treated legally as certificates. They are considered as safe in court. This has been verified in several fictitious court trials [14].

A QeS generation has a validity of approximately five years. Before the expiration date, it is replaced by a new QeS generation. For this reason, more than 10 years ago, PTB developed a procedure for ensuring the long-term preservation of cryptographically signed documents. This has resulted in an international standard [24], a DIN standard [25] as well as a translation recommendation from the Federal Office for Information Security (BSI) [26]. Various manufacturers have certified their products according to [24, 26]. PTB has such a product.

In addition to the installation of the QeS, the encryption of the DCC for safe transport from the calibration laboratory to the customer has been established with this method. In addition, the customer receives the public key of the calibration laboratory.

For the above reasons, there have been applications in Germany for a long time, for which the protection of integrity and authenticity have been of vital interest. Examples which may be mentioned are:

- legislation on personal status (registry office; effects on the law of inheritance),
- waste management, and
- procurement for the federal administration in Germany.

In the meantime, many EU Member States have also adopted corresponding legal regulations. Therefore, the EU has adopted the so-called eIDAS Regulation [27], which is valid alongside SigG [22] and SigV [23]. In addition to the QeS, digital seals can also be used. The implementation of the eIDAS Regulation has not yet been completed.

3 Structure of the digital calibration certificate

The general structure of a DCC is subdivided into four areas:

- administrative data (regulated area),
- measurement results (partially regulated area),
- comments (not regulated area), and
- document (additional area).

XML is provided as a data format with the corresponding schema files.

3.1 Administrative data (regulated area)

Administrative data contains information of central interest. The data fields are fixed. The information is usually on the first page of an analogue calibration certificate. The data are used to clearly identify the calibration laboratory, the calibration object and the calibration customer.

Table 2 lists the fields fixed by PTB and DAkkS. They apply to the DCC accordingly.

The identifiers are defined. The data, such as, e.g. “date of calibration” are formatted according to international standards. Letters are allowed in the form of Unicode. Numbers are represented in

Table 2:
List of fixed fields
from [1–3].

English	German	Meaning / remark	Ref.
Letterhead	Briefkopf	Name and address of laboratory	[1–3]
Accredited by the	akkreditiert durch die	e.g. DAkkS	[3]
As a calibration laboratory in the	als Kalibrierlaboratorium im	e.g. DKD	[3]
Calibration certificate	Kalibrierschein		[1–3]
Object	Gegenstand	Name of the device, brief characterization	[1–3]
Manufacturer	Hersteller	Name of the manufacturer	[1–3]
Type	Typ	Type of the device	[1–3]
Serial No.	Kennnummer[1, 2] Fabrikat/Serien-Nr. [3]	Number of the examined device, standard, preparation	[1–3]
Applicant [1, 2] customer [3]	Auftraggeber	Name of the customer, street, place of business	[1–3]
<i>Number of pages</i>	<i>Anzahl der Seiten</i>	<i>See Note 1 below Table 2</i>	<i>[1, 2]</i>
<i>Number of pages of the certificate</i>	<i>Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines</i>	<i>See Note 1 below Table 2</i>	<i>[1–3]</i>
Reference No.	Geschäftszeichen		[1, 2]
Calibration mark	Kalibrierzeichen	Unambiguous	[1–3]
Date of calibration	Datum der Kalibrierung	Date or start to end of calibration	[1–3]
Date	Datum	Date of issue of the calibration certificate	[1–3]
<i>Signature / seal</i>	<i>Unterschrift / Siegel</i>	<i>See Note 1 below Table 2</i>	<i>[1, 2]</i>
<i>Head of the calibration laboratory</i>	<i>Leiter des Kalibrierlaboratoriums</i>	<i>See Note 1 below Table 2</i>	<i>[3]</i>
<i>Person in charge</i>	<i>Bearbeiter</i>	<i>See Note 1 below Table 2</i>	<i>[3]</i>
Mutual Recognition Arrangement (MRA)	Gegenseitige Anerkennungsvereinbarung	Yes / no	[1–3]

Note 1:
With the DCC, the number of pages is obsolete since no printout occurs. The manipulation of the DCC is excluded using hashes, see Section 2.3.

Note 2:
The method for attaching cryptographic signatures to the DCC allows one or more signatures to be attached. It is also possible to sign several DCCs simultaneously (keyword: mass signature). According to the eIDAS Regulation, the fixing of a seal is also possible. Further information is to be found in Section 2.3.

the form of Arabic numerals. The main language is English, but the information can also be given in another language.

3.2 Measurement results (partially regulated area)

The representation of the measurement results is one of the most challenging tasks to be solved in the shape of the DCC. The reason for this is the variety with which measurement results are presented. In addition, it is necessary to integrate already existing and established data exchange formats into the concept as in [4]. At the same time, a simple structure can be presented for those who do not already have an existing data exchange format. Therefore, this area cannot be generally regulated.

However, what is strongly regulated is that the measurement results must be presented completely and only on the basis of the SI [5]. They can be represented as a scalar, vector, matrix or tensor. A complete measurement result includes the following data:

- identifier,
- measurement value,
- expanded measurement uncertainty,
- coverage factor,
- unit, and
- time.

The information on the time is furthermore optional. The identifiers are composed of Unicode letters. The numbers and time formats are defined according to existing standards. The representation of the enlargement factor and the unit are given. The guidelines are based on the standards of the BIPM.

Units that are outside the SI can also be displayed (e.g. nautical miles, millimetres of mercury, degree of Oechsle). Irrespective of this, the data in SI are always valid.

The use of an individual data structure is possible provided the results are complete and take the SI

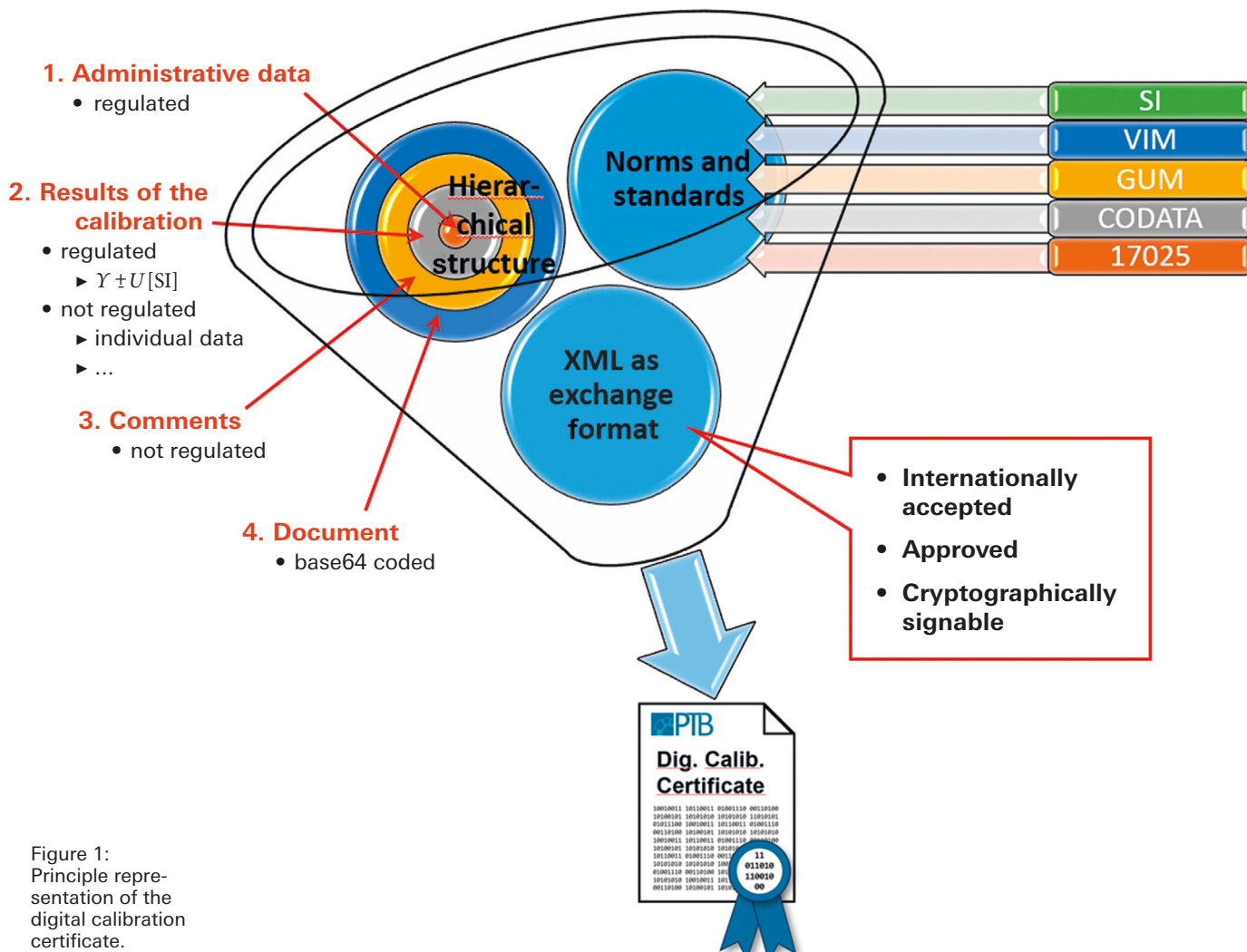


Figure 1: Principle representation of the digital calibration certificate.

into account. In the case of the individual data structures, it must be considered that often descriptive components and information on measurement uncertainties are not available. In these cases, adjustments must be made. In addition, tools must be provided to visualize the content.

The universal data structure is a linear structure. It consists of blocks of text and blocks with measurement results. The text blocks serve as an explanation of the results of the measurements and can be carried out, in addition to English, in other languages. The advantage of the universal data structure is its simple and universal use. Within the scope of developments, PTB will develop tools for creating universal data structures, as well as provide tools for their visualization.

3.3 Comments (not regulated area)

The comments section contains individual information about a measurement process, which provides further information on the measurement results. This range can be used optionally and without requirement. Possible data are, for example, graphics from measurement curves, video or audio information, as well as individual measurement series in any format.

3.4 Document (additional area)

In this area, an optional version of the calibration certificate stored in PDF-A can be stored according to the previous paper publication. Users of the DCC can thus see an image of their usual calibration certificate during the transition to a digital world. Using the Base64 encoding scheme [28], the PDF-A can be stored in XML together with the information set mentioned above.

4 Need for action when handling digital calibration certificates

4.1 Problem of retractability

A DCC must also be able to be retracted. It is, however, possible at any time to make copies of a DCC which are identical to the original. SigG [22], SigV [23] and the eIDAS Regulation [27] do not provide for the withdrawal of digitally signed documents.

4.2 Solutions for the retraction of digital data

Two different methods have been investigated. Both need a trustworthy body, which still has to be established.

According to SigG and SigV, it is possible to block a QeS through an entry in a register. The validity period of a QeS is also recorded in this register. Both pieces of information can be requested by a user of the infrastructure. This is done by querying the certification authority (CA) according to the online certificate status protocol (OCSP) [29]. In analogy to this, a trustworthy site could be used to provide a list of valid DCCs. An automated query for this service together with an integrity and authenticity check would have to be realized. The simplest variant of the service would be to keep a list of the hash values of each DCC.

Another possibility would be the use of blockchain technology, see, e.g., [30]. The retraction of electronically issued certificates was shown by the example of an examination certificate [31]. There is already a higher education institution that is using the procedure [32]. The method is tamper-resistant in a public blockchain with a

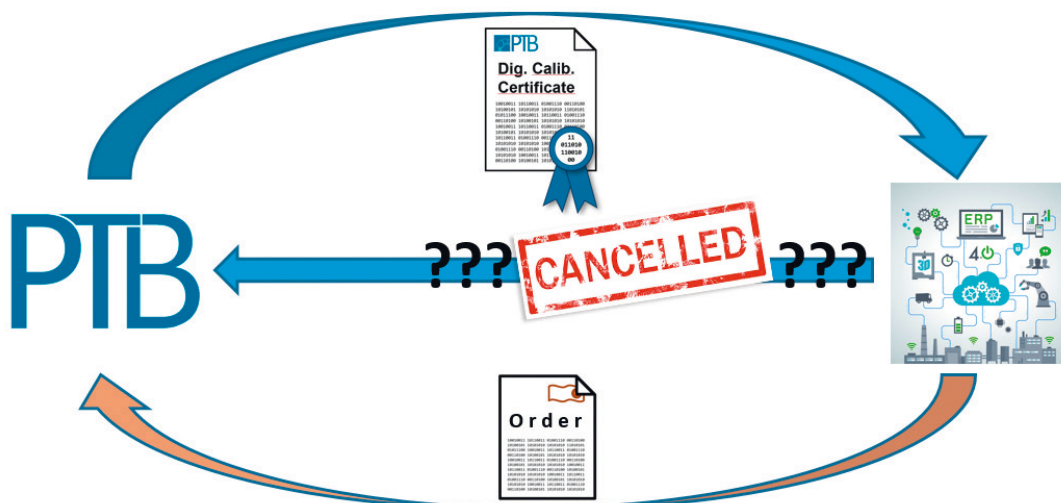


Figure 2: Digital calibration certificates must be retractable.

trustworthy site. However, the blockchain also has weaknesses in long-term availability, in addition to its cryptographic weaknesses (It is not defined which software and which method is used.). Another disadvantage of the blockchain is that the calculation of a blockchain is very computationally intensive and thus energy-intensive. Therefore, it is only suitable for a manageable number of records (approximately to 105) if the records themselves are in the range of a few MB.

4.3 Validity of the digital calibration certificate in Germany, the EU and the world

A legal view on the validity and legal resilience of DCCs in Germany seems to be given by the numerous investigations undertaken in the field of use of the QeS, see below. Comparable studies are planned at EU level as well as at the international level.

5 Digital twin – Project Gemimeg

In the future, a customer of PTB (or a calibration laboratory) will decide whether a DCC for the relevant calibration material would be satisfactory or whether referring to the consistent further development of the DCC, the DT, would be preferable. The DT will include additional data and software as well as the DCC. Figure 3 shows the generic approach of the DT.

The DT of the calibrated measuring instrument provides plenty of new possibilities. Added value can be generated by the simulation of manufacturing processes alone. This results in a significant increase in the quality of the production, since the behaviour of the measuring device is precisely known. In the production of small quantities, this results in an increase in efficiency because the

simulation of the production process results in a significant advantage. This becomes clear when considering the life cycles in the reference model of industrial 4.0 components (e.g. [33]) and the RAMI 4.0 model [34].

6 References

- [1] *PTB form for issuing a calibration certificate with reference to CMC*, PTB.
- [2] *PTB form for issuing a calibration certificate without reference to CMC*, PTB.
- [3] *DAkKS: Paper DAkKS-DKD-5, Anleitung zum Erstellen eines Kalibrierscheines*, http://www.dakks.de/sites/default/files/dakks-dkd-5_20101221_v1.2.pdf. (Last accessed: 15.1.2018).
- [4] *VDI/VDE GUIDELINE, VDI/VDE 2623: Format for data exchange in management of measuring and test equipment*, February 2012.
- [5] *BIPM: Standard, Le Système international d'unités/ The International System of Units (Brochure sur le SI/SI brochure)*, 2006.
- [6] B. Brinkmann: *International vocabulary of metrology, Basic and general concepts and associated terms (VIM)*, ISO/IEC Guide 99:2007 = *Vocabulaire international de métrologie, Wissen : Messwesen*, Berlin, Vienna, Zurich, Beuth, 2012.
- [7] *BIPM: Standard JCGM 104:2009: Evaluation of measurement data – An introduction to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” and related documents*, July 2009.
- [8] CODATA recommended values of the fundamental physical constants.
- [9] P. J. Mohr, D. B. Newell, B. N. Taylor: *CODATA recommended values of the fundamental physical constants*, *Reviews of Modern Physics* 88 3, p. 337, 2014.
- [10] *DIN EN ISO/IEC DIN EN ISO/IEC 17025:2005, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*, August 2005.

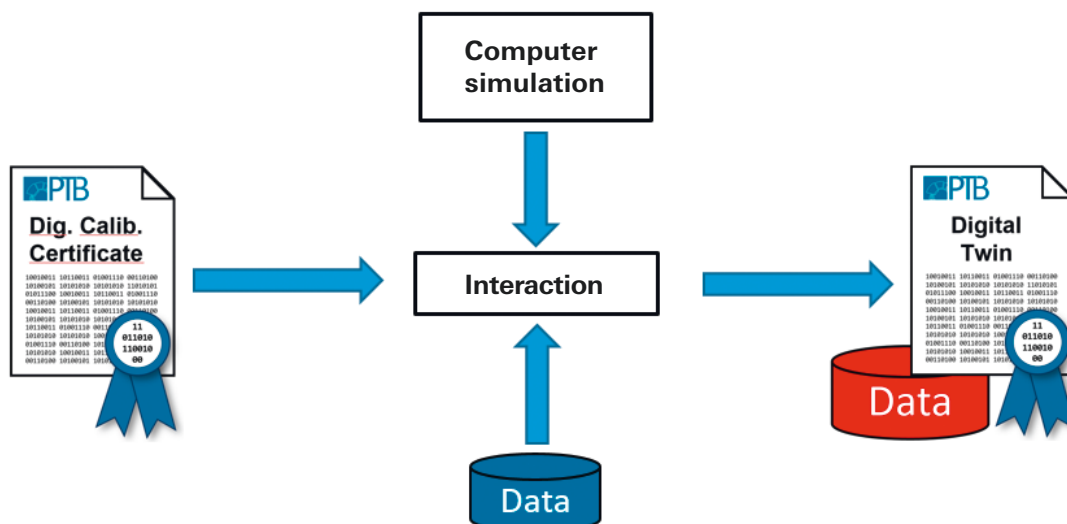


Figure 3:
Generic approach
of the digital twin.

- [11] Draft. *The International System of Units (SI) – DRAFT*.
- [12] ISO/IEC/DIS ISO/IEC/DIS 17025, 2016-10-21, ISO/IEC/DIS 17025 – Clean version (ISO/CASCO/WG 44 N 96).
- [13] *Extensible Markup Language (XML) 1.0* (Fifth Edition), <https://www.w3.org/TR/xml/>. (Last accessed: 10.10.2017).
- [14] P. C. Johannes: *Beweissicheres elektronisches Laborbuch, Anforderungen, Konzepte und Umsetzung zur langfristigen, beweiswerterhaltenden Archivierung elektronischer Forschungsdaten und -dokumentation*, Der Elektronische Rechtsverkehr, Vol. 29, Baden-Baden, Nomos, 2013.
- [15] www.archisafe.de, <http://www.ptb.de/cms/archisafe/startseite.html>. (Last accessed: 06.06.2017).
- [16] Wikipedia: *Extensible Markup Language*, <https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=164814823>. (Last accessed: 07.06.2017).
- [17] H. Vonhoegen: *Einstieg in XML, Grundlagen, Praxis, Referenz*, Rheinwerk computing, Bonn, Rheinwerk, 2015.
- [18] nestor – Home, http://www.langzeitarchivierung.de/Subsites/nestor/DE/Home/home_node.html. (Last accessed: 11.10.2017).
- [19] *Technical Specification, Identification of units of measurement for computer-based processing*, January 2017.
- [20] IEC: *Common Data Directory*, IEC 61360, <https://cdd.iec.ch/>. (Last accessed: 11.10.2017).
- [21] K. Schmech: *Kryptografie, Verfahren, Protokolle, Infrastrukturen*, iX-Edition, Heidelberg, dpunkt-Verl., 2009.
- [22] SigG, *unofficial table of contents*, http://www.gesetze-im-internet.de/sigg_2001/. (Last accessed: 06.06.2017).
- [23] SigV, *unofficial table of contents*, http://www.gesetze-im-internet.de/sigv_2001/. (Last accessed: 06.06.2017).
- [24] BSI-CC-PP-0049-2014, https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Zertifikate_CC/PP/aktuell/PP_0049+PP0049_2014.html. (Last accessed: 06.06.2017).
- [25] DIN 31647:2015-05, Beuth.de, <https://www.beuth.de/de/norm/din-31647/229134562>. (Last accessed: 11.10.2017).
- [26] BSI TR-ESOR, Main document, https://www.bsi.bund.de/DE/Publikationen/TechnischeRichtlinien/tr03125/index_htm.html. (Last accessed: 19.07.2017).
- [27] EU: eIDAS, Official Journal L 257/2014, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=OJ:L:2014:257:FULL&from=EN>. (Last accessed: 11.10.2017).
- [28] Wikipedia: Base64, <https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=164159739>. (Last accessed: 07.06.2017).
- [29] RFC 6960: X.509 Internet Public Key Infrastructure Online Certificate Status Protocol – OCSP, 2017, <https://tools.ietf.org/html/rfc6960>. (Last accessed: 11.10.2017).
- [30] Deloitte: *Vorstellung der Blockchain-Technologie, "Hallo, Welt!"*, <https://www.bing.com/search?q=blockchain+zeugnis&PC=U316&FORM=CHROMN>. (Last accessed: 21.07.2017).
- [31] *Information about Showcase, Zeugnisvalidierung über Blockchains*, Innovation Lab at the Digitalgipfel 2017, Speyer 2017.
- [32] *Academic Certificates on the Blockchain* (up to March 2017), <https://digitalcurrency.unic.ac.cy/free-introductory-mooc/self-verifiable-certificates-on-the-bitcoin-blockchain/academic-certificates-on-the-blockchain/>. (Last accessed: 21.07.2017).
- [33] Plattform Industrie 4.0 (Ed.): *Struktur der Verwaltungsschale – Fortentwicklung des Referenzmodells für die Industrie 4.0-Komponente*.
- [34] R. Heide, F. Elmas: *Industrie 4.0 Basiswissen RAMI4.0*, Referenzarchitekturmodell mit Industrie 4.0-Komponente, Berlin, Vienna, Zurich, Beuth Verlag GmbH, VDE Verlag GmbH, 2017.

Acknowledgment

The authors would like to thank Mr. Czaske (PTB), Mr. Wolf (DAkKS) and Mr. Ulbig (PTB) for their interesting and active discussion and Mr. Czaske for his review of the manuscript.

A Digital Quality Infrastructure for Europe: The European Metrology Cloud

Florian Thiel¹, Marko Esche², Federico Grasso Toro³, Daniel Peters⁴,
Alexander Oppermann⁵, Jan Wetzlich⁶, Maximilian Dohlus⁷

1 Introduction

Innovation is essential to European competitiveness in the global economy. Industry accounts for 80 % of Europe's exports and some 65 % of private sector research and development investment comes from manufacturing. Small and medium-sized enterprises (SMEs) are a very important part of the European economy, as they represent around 99 % of all enterprises and employ an increasing number of persons [EUST2017].

Therefore, industrial modernization in Europe must be broad-reaching and must include the successful commercialization of product and service innovations, the industrial exploitation of innovative technologies and innovative business models. New growth opportunities come from providing new products and services from, technological breakthroughs, new processes and business models, non-technological innovation and innovation in the service sector [COM2017].

The European Commission sees an enormous economic benefit could be gained from a digital single market. Hence, the Commission has issued a Digital Single Market Strategy for Europe to push the most essential aspects like cloud computing, big data and platforms [COM2014/442], [COM2015/192], [COM2016/288].

Drivers of the digital transformation in legal metrology are the increasingly globalized market place, the ever-increasing drive for efficiency and the rapidly developing consumer demands. Seizing the chances of digitalization outlined by the European Commission could resolve existing obstacles for innovation in this sector.

The New Approach of the European Commission [COM2016/C272] sets up a quality infrastructure where measuring instruments and related legal processes are embedded. A quality infrastructure is generally understood to be the totality of the institutional framework (public and private) required to establish and implement

standardization, metrology (scientific, industrial and legal), accreditation and conformity assessment services (inspection, testing and product and system certification) necessary to provide acceptable evidence that products and services meet defined requirements, be it demanded by authorities or the market place.

It is estimated that there are 850 million measuring instruments on the EU market which are governed by European directives of this New Approach (e.g. 2014/31/EU and 2014/32/EU). In most industrialized countries, legally relevant measurements are responsible for a share of 4 % to 6 % of the European gross domestic product (GDP), equivalent to 660 – 990 billion euros per year.

It is felt by the European manufacturers' associations that the implemented processes within the quality infrastructure hamper the use of technological breakthroughs providing new products, the exploitation of the technological potential to streamline the processes, and the development of new data-based business models [IT2017], [PC2017].

The manufacturers' associations envision marketing concepts based on innovations which are driven by technologies that have matured significantly over the past ten years – namely embedded systems, the Internet of Things (IoT), cyber-physical systems, cloud computing, big data and platform concepts. Hence, in legal metrology, the transition from an instrument with locally concentrated parts towards distributed hardware and cloud-located stored data, data-based services and virtualized processing software is already recognizable (see Figure 1). This approach is pushed by the manufacturers' associations in Europe who are ever more frequently asking for legally acceptable architectures for such technologies, whenever they see a possible economic advantage.

In addition, today, measuring instrument sensors are often fully developed within the

¹ Dr. habil. Florian Thiel, Department 8.5, "Metrological Information Technology", e-mail: florian.thiel@ptb.de

² Dr.-Ing. Marko Esche, Working Group 8.51, "Metrological Software", e-mail: marko.esche@ptb.de

³ Dr.-Ing. Federico Grasso Toro, Working Group 8.51, "Metrological Software", e-mail: federico.grassotoro@ptb.de

⁴ Dr.-Ing. Daniel Peters, Working Group 8.52, "Metrological ICT Systems", e-mail: daniel.peters@ptb.de

⁵ Alexander Oppermann, Working Group 8.52, "Metrological ICT Systems", e-mail: alexander.oppermann@ptb.de;

⁶ Jan Wetzlich, Working Group 8.52, "Metrological ICT Systems", e-mail: jan.wetzlich@ptb.de

⁷ Maximilian Dohlus, Working Group 8.52, "Metrological ICT Systems", e-mail: maximilian.dohlus@ptb.de

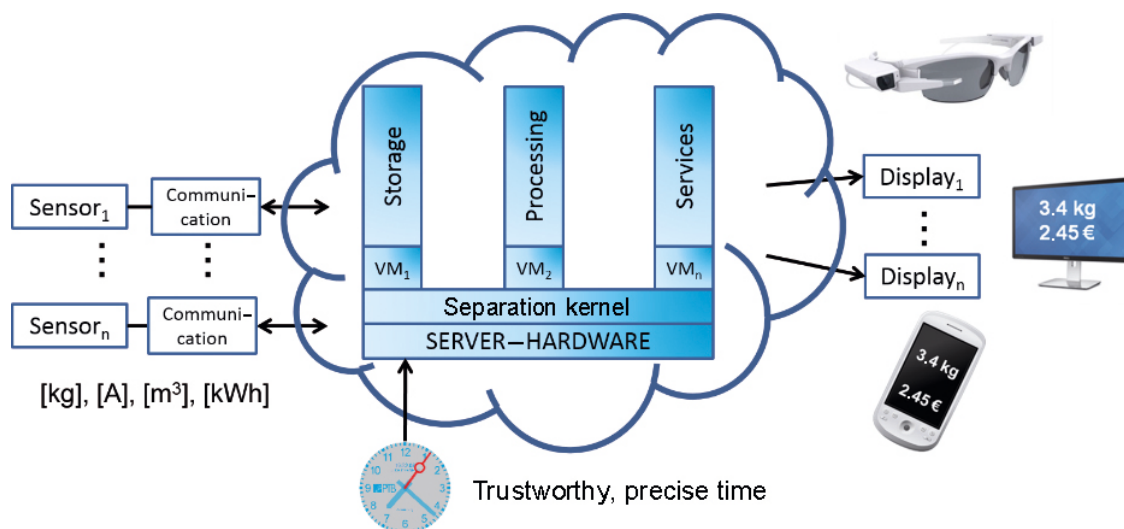


Figure 1: Instrument with distributed and virtualized components and data-based services.

scope of the required measurement accuracy. New business and service models will therefore address individual customer requirements which are determined based on user data and data collected in the field. Consequently, the need to offer data-based services and business models – for example, based on big data processing schemes – will increase.

The objectives of the European initiative described here aim at addressing these needs by setting up a digital quality infrastructure to improve the coordination in Europe by technology- and data-driven legal metrology services – the “European metrology cloud” – whilst guaran-

teeing transparency appropriate for conformity assessment and market surveillance in an increasingly globalized economy (see Figure 2).

2 Legal metrology and its economic footprint

Correct and traceable measuring instruments can be used for a variety of measurement tasks. Those responding to reasons of public interest, public health, safety and order, the protection of the environment and the consumer, of levying taxes and duties and of fair trading, which directly and

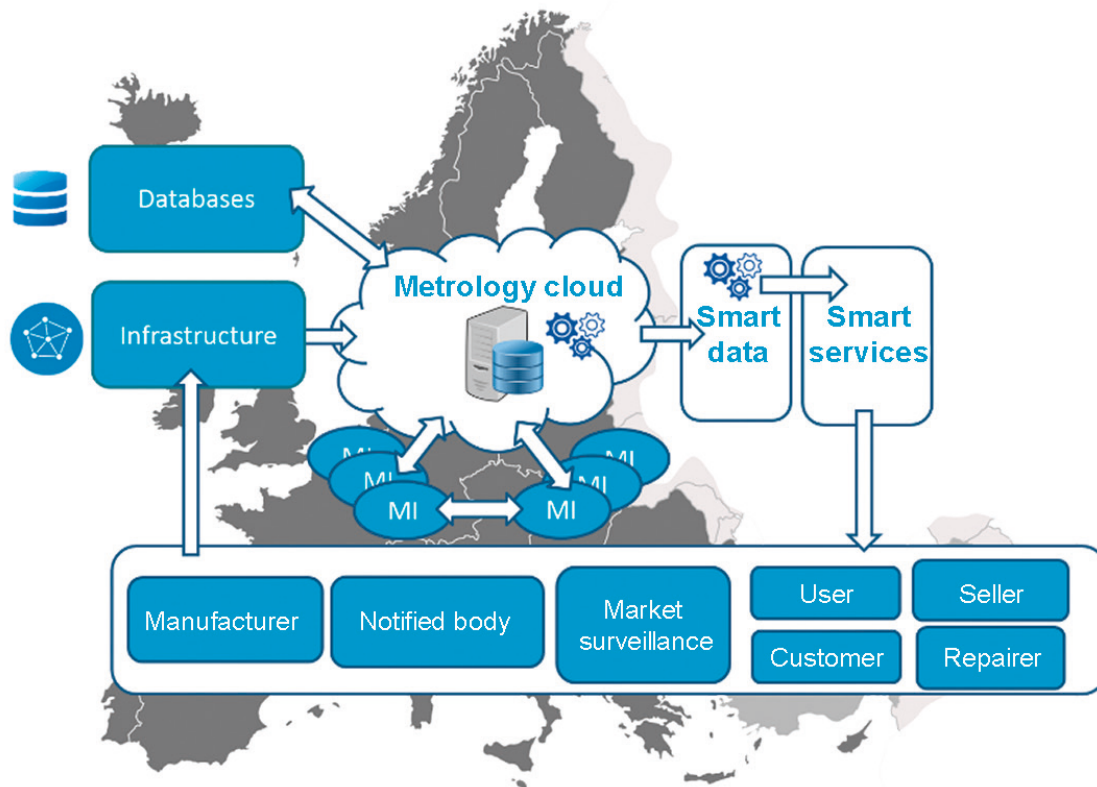


Figure 2: The “European metrology cloud” – A digital quality infrastructure for Europe. MI: measuring instrument.

indirectly affect the daily life of citizens in many ways, may require the use of legally controlled measuring instruments.

To support the intelligibility of the need of the initiative, a brief description of legal metrology and its economic footprint will be provided in the following.

In legal metrology, a restricted community exchanges sensitive information regarding regulated measuring instruments within legally guided processes to guarantee confidence in the correctness and traceability of the measurements and to protect the customer and the user. The stakeholders in legal metrology consist of the users and manufacturers of the measuring instruments, the national notified bodies – often a National Metrology Institute (NMI) – and the national authorities responsible for market surveillance and verification/inspection of the instruments in the market. The responsibilities and rights of these stakeholders are regulated by European directives within the New Approach [COM2016/C272] which sets up a quality infrastructure for products, such as 2014/31/EU and 2014/32/EU, and regulations, such as 765/2008 and Decision 768/2008/EC.

The **14 classes of measuring instruments** which are governed by the directives include water meters, gas meters and volume conversion devices, active electrical energy meters, thermal energy meters, measuring systems for the continuous and dynamic measurement of quantities other than water, weighing instruments, taximeters, material measures, dimensional measuring instruments, exhaust gas analysers and non-automatic weighing instruments. The laws of the Member States add further instrument classes, such as measuring instruments for public traffic, for radiation protection, for “intelligent” or “smart” metering and for temperature, to name but a few.

The European regulations apply to 345 million units of measuring instruments that are sold annually in the European market [COM2010]. In 2010, the annual turnover of the sector was estimated at 7 billion euros [COM2010]. In several Member States, the number of measuring instruments sums up to 150 different types, e.g. in Germany. Based on each Member State’s contribution to the GDP [WP2017], an estimate of 850 million measuring instruments in the EU market can be given. The largest share is attributable to the area of meters, such as electricity, gas, water and heat meters, weighing instruments and measuring instruments for measuring the volume of mineral oil. In most industrialized countries, legally relevant measurements are responsible for a share of 4 % to 6 % of the European GDP [DP2015] (660 – 990 billion euros per year).

The notified bodies carry out conformity assessments of a measuring instrument and grant type approval certificates when appropriate. There are 120 such notified bodies listed in an EU database [COM/NANDO]. One of Germany’s notified bodies, the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), issued approximately 600 certificates for measuring instruments covered by 2014/31/EU and 2014/32/EU in 2016. Based on the GDP basis, it can be estimated that 2400 certificates were granted in the European Union by the notified bodies in 2016. After putting a measuring instrument into use, the market surveillance and verification authorities are responsible for monitoring their proper use, repair and reverification. There are 205 market surveillance institutions working on this task in Europe [COM/MS]. According to the amount of verifications done in Germany in 2014 [AGME2014] (~1 million), it can be estimated that the market surveillance bodies carry out 5 million verifications per year. More than 80 % of these are verifications taking place after a repair. There are 900 European companies active in the production of measuring instruments [COM2010] together with many being partly active in related fields as well as providing millions of jobs in Europe. They are organized in manufacturers’ associations such as CECIP, CECOD, FARECOGAZ, AQUA, ESMIG, VDMA, etc.

3 Demands of a globalized market

To keep this market segment growing, the manufacturers’ associations envision marketing concepts based on innovations which are driven by the ever-increasing demands of the globalized market and being facilitated by technologies that have matured significantly [IT2017], [CP2017].

The manufacturers object that the implemented processes set up by regulations and realized by the current analogue quality infrastructure hamper the use of these technologies and the exploitation of their possibilities.

In this context, manufacturers consider the following “inhibitor to innovation” as relevant: Regulated processes – as established today – are considered to increase the time to market. A knowledge gap regarding IT knowledge between manufacturers, the notified bodies and/or the market surveillance and verification authorities can be identified, i.e. the authorities are not acting at “eye level” with the manufacturers (or vice versa). It is therefore felt that the authorities either refuse innovative solutions due to a lack of technological expertise or “bend” them, to squeeze them into known concepts. For the same reason, it is claimed that notified bodies or verification authorities require too much security, rendering the costs of the requested IT security inadequate. Or, on the

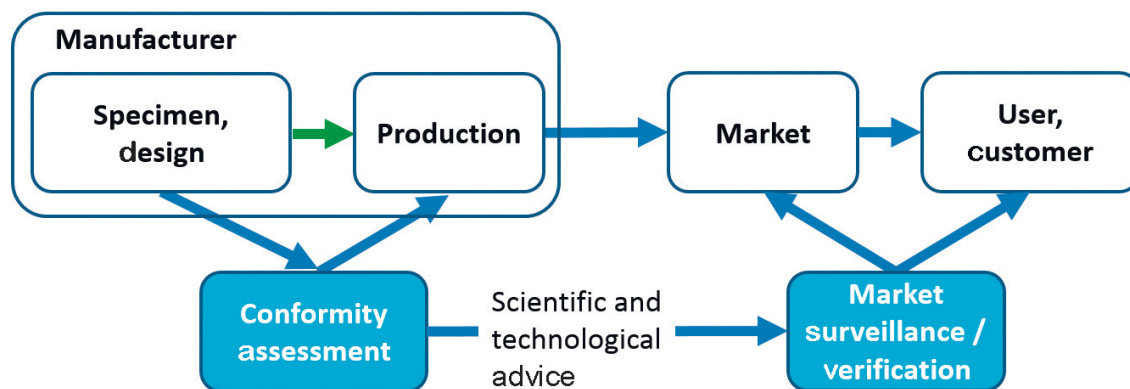


Figure 3: The part of the quality infrastructure regarding conformity assessment and market surveillance.

contrary, they do not demand a sufficient security level which is to the detriment of the customer.

Additionally, the manufacturers object that the harmonization of processes in Europe needs to be developed to overcome barriers to trade. They feel that there is a lack of coherence in the way Member States carry out conformity assessment and verification of measurement instruments in the field, hence hampering a unified quality standard and the envisioned free flow of goods within the European single market.

The urgent needs of the manufacturers to streamline existing processes by exploiting the technological possibilities provide the guiding objectives that the initiative “European metrology cloud” will address.

4 The current situation

Legal metrology establishes confidence in the correctness of measurements and the protection of users of measuring instruments and their customers. The legal framework defines a quality infrastructure, which supervises the integration of new products in the market and also encompasses the product design and the subsequent production, the placing on the market and finally the use of the product. This supervision is shared by national notified bodies, market surveillance authorities and verification authorities.

Notified bodies assess the conformity of the design and the production to the essential requirements, whereas the market and user surveillance bodies supervise the placing on the market and the correct use of the instruments. The verification and inspection authorities are tasked with the re-verification and inspection of the instrument, respectively. In this way, a chain of trust is established, stretching from the development phase via production to the instrument in use (see Figure 3).

Within this legal framework, a multitude of processes are defined and established in a certain way, applying traditional communication paths. These processes include the exchange of information between partners. Examples are the documentation of the instrument design provided by the

manufacturer during the assessment of conformity at the notified body, communication between the market surveillance body and the manufacturer when the instrument is put into use, or correspondence between the manufacturer and the verification authorities during the re-verification phase after the repair of an instrument. The interaction within these processes is currently not based on state-of-the-art communication paths or coordinated via platforms. Furthermore, an obligation for collecting specific data of the instruments for each role in this context has been set up. The notified body may keep a database of the tests during conformity assessments and documentation of all the individual instruments carried out by them. This is highly sensitive information. Another example is the performance data of a measuring instrument. The manufacturers shall carry out sample testing of measuring instruments made available on the market, investigate and keep a register of complaints, of non-conforming measuring instruments and of measuring instrument recalls, and shall keep distributors informed of any such monitoring. Data the market surveillance authorities shall collect include the data necessary for the identification of the non-compliant measuring instrument, the origin of the measuring instrument, the nature of the non-compliance alleged and the risk involved, the nature and duration of the national measures taken and the arguments put forward by the relevant economic operator. Retrieving data from metrology databases is done on request in the traditional ways based on queries carried out by the keeper of the database as an intermediary, and transferred back by this role to the requestor. Direct queries by an authorized partner upon data provided by the partners have not been established so far. There are several processes in place where a large number of different partners are involved and their agreement is needed based on different actions which have to be carried out before a final process could be initiated. A prominent example is the change, repair or update of legally relevant software. There are good prospects for streamlining such a process if it is rendered digital via a platform.

4.1 Seizing the chances of digitalization

Seizing the chances of digitalization could resolve existing obstacles for innovation within the analogue quality infrastructure set up by legal metrology and foster its digital transformation. The rapid change towards digital approaches is facilitated by the developing information technologies and global political initiatives which foster a data-driven digital market, e.g. by the G20 [OECD2017], the European Commission [COM2014/442] [COM2014/25] and nationally [BR2014]. These initiatives recommend supporting innovative products and joining existing infrastructures and databases via appropriate platforms.

To remove the barriers to innovations within the regulated processes and non-harmonized procedures in legal metrology, it is envisioned to use state-of-the-art digital technology to render those processes digitally for the sake of streamlining and harmonizing.

Conventional concentrated instruments will be replaced or amended towards a distributed hardware system together with virtualized software parts and data-based services. Such virtual measuring instruments allow data storage in a cloud infrastructure, combine those data with other data sources, offer measuring and processing software in the cloud as “software as a service” (SaaS) and provide access to the instrument or its parts via communication networks. On this basis, new technological and data-driven services are possible. For these distributed instruments, the manufacturers’ associations in Europe ask for legally acceptable solutions, for they see an economic advantage in this transition which they would like to exploit [IT2017], [PC2017].

Since the required measurement accuracy of measuring instrument sensors is defined by law, its increase is no longer a case for business. Contemporary business and service models therefore

address individual customer requirements which are determined based on user and/or non-legal instrument data and will trigger the increased provision of data-based services. For the billions of measuring instruments used on the EU single market, data volumes are generated during their life cycle from the approval and market surveillance processes as well as from the service the manufacturer provides. The size of these data volumes suggests that “big data” solutions could be used to create smart services that can simplify the processes – and therefore the work – of all parties involved. Especially the administrative data of the instrument could serve as one valuable database.

The key issues relevant in our framework are the use of existing infrastructures and databases and their merging via an appropriate platform and providing innovative products to fully benefit from these merged elements via this platform.

Therefore, our proposal for a European virtual quality infrastructure is based on the possibilities state-of-the-art information technologies offer, incorporating the potentialities of the existing distributed infrastructures and databases of the stakeholders, and aiming to improve the coordination in Europe by technology- and data-driven legal metrology services provided via an appropriate platform.

4.2 Objectives of the initiative

The four main objectives of the initiative which form the guiding frame for the work to be done are described in the following.

4.2.1 Objective 1: The trustworthy metrological core platform

The central aim of the initiative is to develop the trustworthy metrology “core” platform (TMC platform) for the European metrology cloud (see Figure 4).

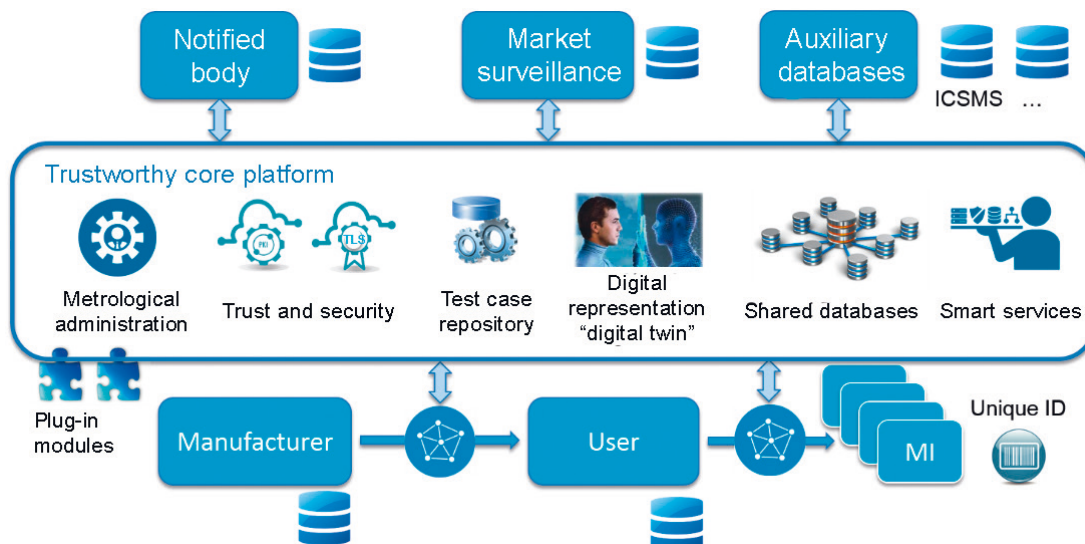


Figure 4: The concept of the trustworthy metrological core platform. Plug-in modules could be, e.g. e-certificates for calibration, conformity or e-verification markings, etc.

This platform will serve to implement digital concepts for the coordination, concentration, simplification, harmonization and quality assurance of metrological services for the Member States and all parties involved. To this end, the platform consists of elementary modules which allow sharing of the existing databases and infrastructures. It guarantees interoperability, an adaptable level of trust and security, and provides trustworthy metrological administration as a service. In this way, the platform allows further services to be incorporated as “plug-in modules” which use the elementary elements.

This central, trustworthy national element is required for the joining of existing infrastructures and databases already in use by the stakeholders in the Member States. Due to their role and work over the last few decades, the **National Metrology Institutes**, i.e. the notified bodies, have built up confidence and trust in their work and inherent high reputation. The certificates granted and services provided by these institutions are considered a sign of quality – in several cases worldwide. Consequentially, the National Metrology Institutes are the suitable **impartial partner** in the field of legal metrology to host such a trustworthy metrological platform as an **“anchor of confidence”** and provide metrological administration. The trustworthy metrological administration of services, configurations and monitoring of activities running on the platform fills a gap, since the role of an administrator is not known in the legal metrology’s regulations.

If different infrastructures are combined and data are exchanged, the question of standardization arises. The current Internet application domain has avoided the dominance of a very limited number of private or public parties. Its “hourglass model” with minimal, rigorous standards and protocols and maximum freedom of implementation has major advantages. It was strongly advised by the Commission High Level Expert Group on the European Open Science Cloud [COM/EOSC2016] to follow a similar approach to implement the European Open Science Cloud (EOSC) [COM/EOSC]. It will allow open and common implementation and so will prevent costly and time-consuming exercises to decide who has the best solutions. Instead, it will allow participation from all stakeholders. All providers, public and private, can start implementing prototype applications for the sharing of data and services on the day minimal standards and the minimal rules of engagement are released. For that purpose, platform independent and open platform communication interoperability standards already broadly applied, like the Open Platform OPC UA [OPCP2017] [BSI/OPC/2017], will be considered for the secure and reliable exchange of data to

ensure the seamless flow of information among devices from multiple vendors.

The standards derived from the Mandate M/441 to CEN, CENELEC and ETSI in the field of measuring instruments for the development of an open architecture for utility meters involving communication protocols enabling interoperability and the Smart Grid Mandate M/490 issued by the European Commission and EFTA to develop a framework in the smart grid field will be considered in this approach [M/441] [M/490]. Additionally, Regulation (EU) No 910/2014 [COM2014/910] of the European Parliament and of the Council on electronic identification and trust services for electronic transactions in the internal market will be considered and the results from our former EMRP projects ENG04 SmartGrids and ENG63 GridSens will be incorporated in this initiative [ENG04], [ENG63]. For trustworthy authentication, existing approaches (public key infrastructure (PKI)) as well as new concepts based on utilizing, e.g. quantum key distribution (QKD), and non-hierarchical approaches taking physical unclonable functions (PUFs) and the blockchain paradigm into consideration will be investigated

Key challenges:

Based on essential use cases – defined in objectives 3 and 4 – the requirements for the interoperability of the platforms need to be defined, concepts to share confidential information between a subset of partners need to be developed and the feasibility of the functioning of each elementary platform module under experimental and real conditions should be proven.

The following elementary platform modules are needed: a module organizing the sharing of databases, and a module for the sharing of infrastructures. A further module should ensure sustainable trust and security and the last elementary module will be responsible for trustworthy metrological administration.

The digital representation of the measurement instrument – the “digital twin” – from objective 3, will be the central communicative element for the different infrastructures, partners and for each type of measuring instrument and will therefore define the basic requirements to be realized.

Since part of the quality infrastructure set up by European legislation is under the sovereignty of the Member States, e.g. verification of the measurement in use, the national realizations will differ. These differences will be identified and a common technological approach will be set up. In that way, the platform developed in this project can serve as a blueprint for the individual national platforms. These platforms can later be combined via a coordinating platform established and maintained by a board of Member States and industrial stakeholders.

4.2.2 Objective 2: Reference architectures

The next aim is to provide and distribute knowledge via broadly applicable general reference architectures specifically for new and complex technologies fitting the needs of all stakeholders, i.e. the requirements established by the regulations. The IT infrastructure of measuring systems of the future will grow in size as well as complexity and encompass several new basic technologies according to the technology stack of an IoT system (see Figure 5). Legal metrology needs to cope with these separate technologies to provide metrological services for its customers and to support the market entry of innovations.

The process of conformity assessment and market surveillance will be optimized by the research carried out prototyping these architectures, on the risks involved and on how instruments can be verified in the field. The gained knowledge will help to mitigate the risks during these processes for future measuring instruments and will improve the competence of all partners involved.

Key challenges:

The main challenge for the general reference architectures, e.g. for the basic technologies like embedded devices (IoT) and distributed instruments, is to encompass the fulfilment of the essential requirements. These comprise a verifi-

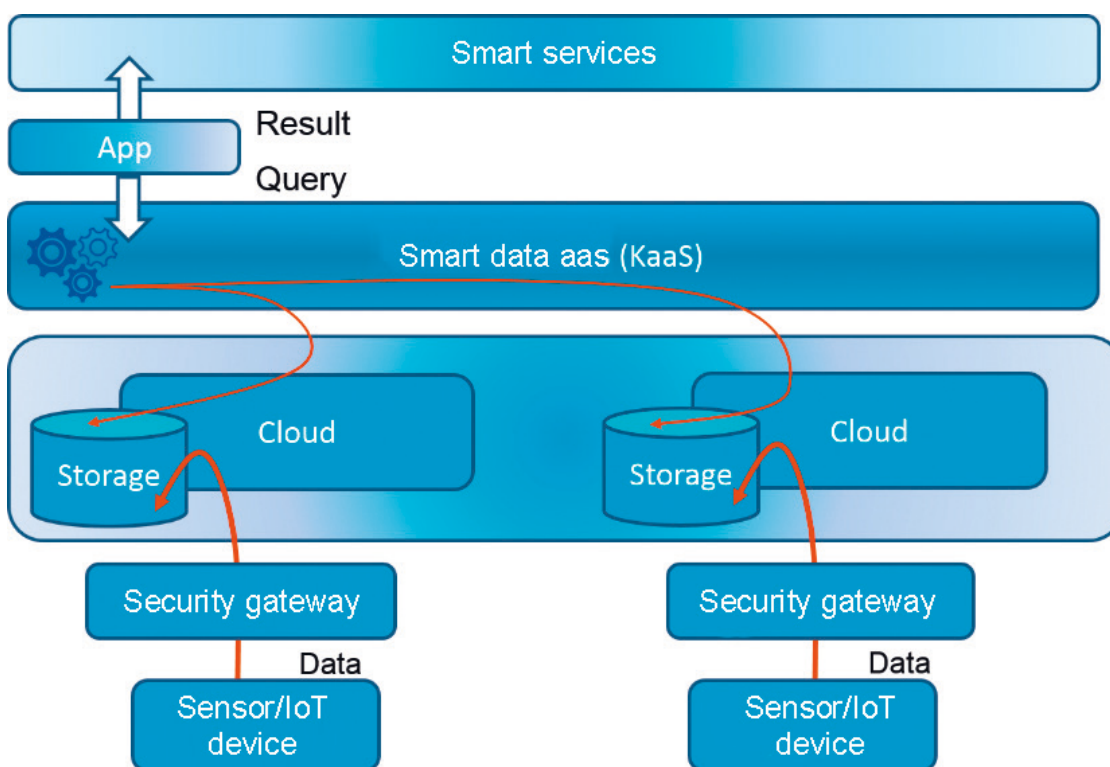


Figure 5: The basic technology stack of an IoT system. KaaS: knowledge as a service.

For these basic technologies, general reference architectures will be developed and tested, e.g. against the “essential requirements” of the MID and contemporary threats. These architectures make full use of the future European digital quality infrastructure, offering easy verification of complex technologies, like cloud computing and interconnected embedded devices (Internet of Things) for market and user surveillance as well as for verification authorities. These innovative technologies open up new opportunities but also pose risks to the security of measuring instruments and radically change how society interacts with them. Therefore, the reference architectures will undergo an adequate risk assessment [ME2105] as required by Directives (2014/32/EU) and (2014/31/EU).

ation method which provides easy inspection of the meter in the market and exploration of contemporary risks and threats for measuring instruments via an adequate risk analysis. To make general reference architectures applicable for a specific class of instruments, e.g. for weighing instruments, heat meters, fuel dispensers, etc., they must fulfil additional instrument-specific requirements and need tailoring to the individual risk class (see Figure 6). The risk analysis, which considers contemporary threats and guarantees comparability throughout Europe, will be made available, and hence would also increase the competence of all partners involved. An agreed list of attack vectors, i.e. a scheme about how threats could be realized, is needed to guarantee comparability of the analysis between the manufacturers and the notified bodies.

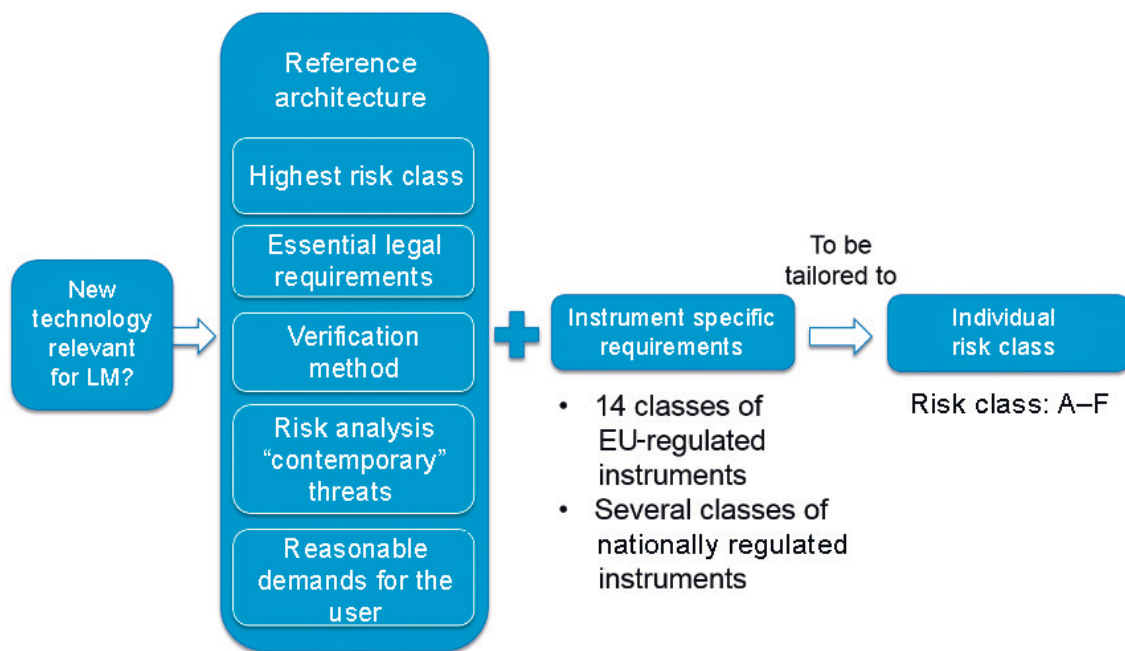


Figure 6: Requirements on a general reference architecture and the required additional steps for a specific class of instruments. LM: legal metrology.

4.2.3 Objective 3: Technology-driven metrological support services

There are several processes defined by European legislation coordinating the interaction of a large variety of partners in legal metrology which could be partly transformed in the digital domain. For instance, results could be made available in a central platform leading to the broader surveillance of meters, better planning of the processes and services and therefore leading to less downtime of the instrument for the user. From these legal processes, we have chosen certain ones for streamlining through digital support. The consortium considers that changing these processes

would be most beneficial regarding the organization of market surveillance and verification, the services of notified bodies and manufacturers, as well as the needs of the users of measuring instruments.

The chosen use cases build on each other and consequentially the solution for one will support the subsequent ones. Use cases for the **repair of a measuring instrument and its subsequent verification**, based on digital representations, might allow the future **maintenance of software** in the instruments.

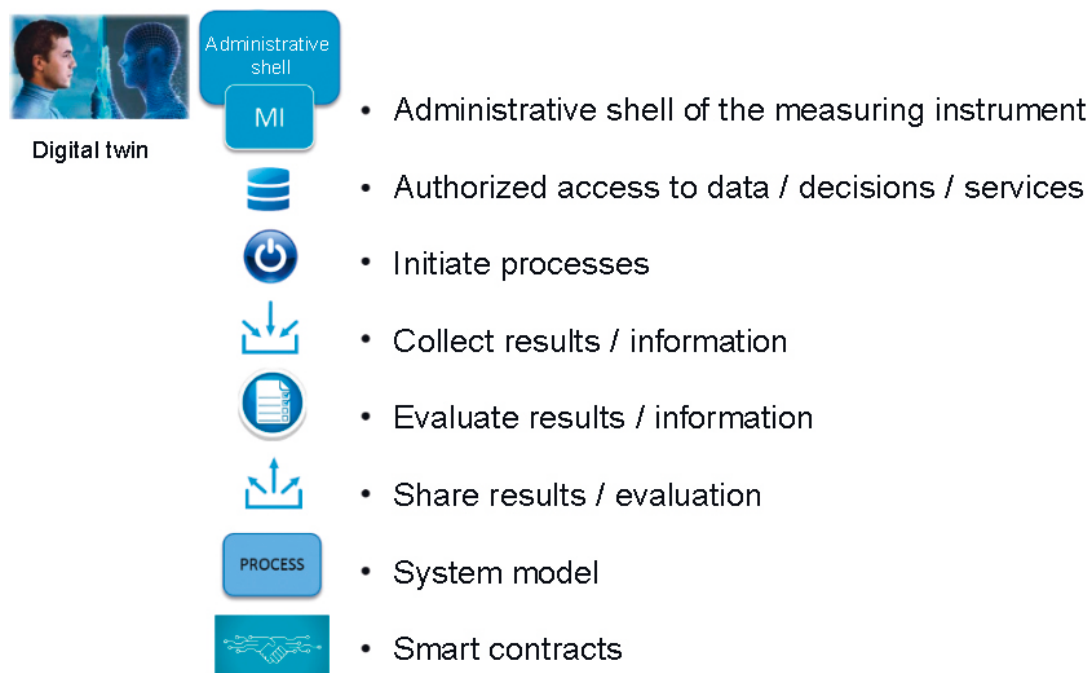


Figure 7: Functions the digital representation of the measurement instrument – the digital twin – might comprise.

Key challenges:

The development of a digital representation of the measuring instrument is vital for the realization (see Figure 7).

This **digital representation** is a hierarchical database which should contain administrative data and information about processes. It should collect data, evaluate data, disseminate data and initiate actions if certain conditions are fulfilled (for example, smart data services, such as smart contracts, i.e. condition-dependent legally binding decision-making, as proposed in objective 4). To this end, a **digital twin** should contain information on the type of instrument and, in a substructure, information concerning that particular instrument. It will also encompass authorization profiles, a log file and a digital sensor or system model of the instrument. This representation will implement the selective sharing of information between authorized partners already established in the analogue world and needs to be developed and tested within the new core platform with special use cases. The challenges for the digital “**support of repair**” and “**support of verification**” as well as the “streamlining of software maintenance” will be considered. This should include the repair by the service technician, remote diagnosis of the repair, indication and information of the verification authority, as well as initial remote testing and subsequent evaluation by the authority and planning of the local test of the physical sensor within the proposed trustworthy core platform (see Figure 8). Further concepts of streamlining by digital methods will be explored for all stakeholders’ benefits, focusing on remote testing modules of the logical part of the digital representation of the instrument.

A selection of types of requests or tests to support verification and inspection might be – in order of complexity – the following: requests of protocols of log files, initiation of runtime integrity tests of the whole system or individual system modules or the whole file system, results of the permanent condi-

tion monitoring of the instruments, the application of fixed test cases for the individual logical modules and finally specific test data generated during runtime by the logical system model

4.2.4 Objective 4: Data-driven metrological support services

The aim is to develop data-based services for legal metrology, a theoretical approach taking advantage of the available data sources created by all stakeholders. For the billions of measuring instruments used on the EU single market, data volumes are generated during the complete life cycle of these instruments from their approval and market surveillance processes as well as from the service the manufacturer provides. These data can be distinguished in the main categories: measurement data, administrative data and service data (see Figure 9). Service data represent data which are, e.g., collected by the manufacturers to coordinate their maintenance services in order to guarantee a constant quality level.

It will be investigated how new services and processes could be derived or existing services could be streamlined using merged data from different sources. The focus of the data collecting process will especially be on data provided from the administrative and service data, since these data hold the potential to make the existing processes even more efficient or could be elevated to be accepted within or to add value to legal metrology.

Key challenges:

To investigate the potentials of combined data from different sources, a **metrological data lake** should be established. After identifying the essential questions to be answered by the data lake, appropriate methods should be identified to transfer these questions to the “machine” to interpret answers into smart data concepts. To this end, contemporary methods, such as data mining, information retrieval and machine learning will be applied

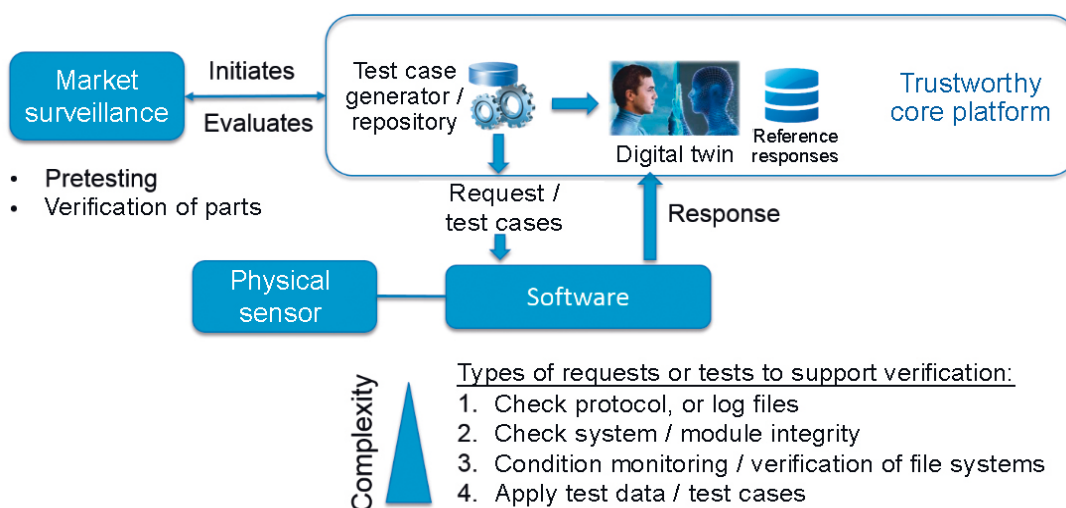
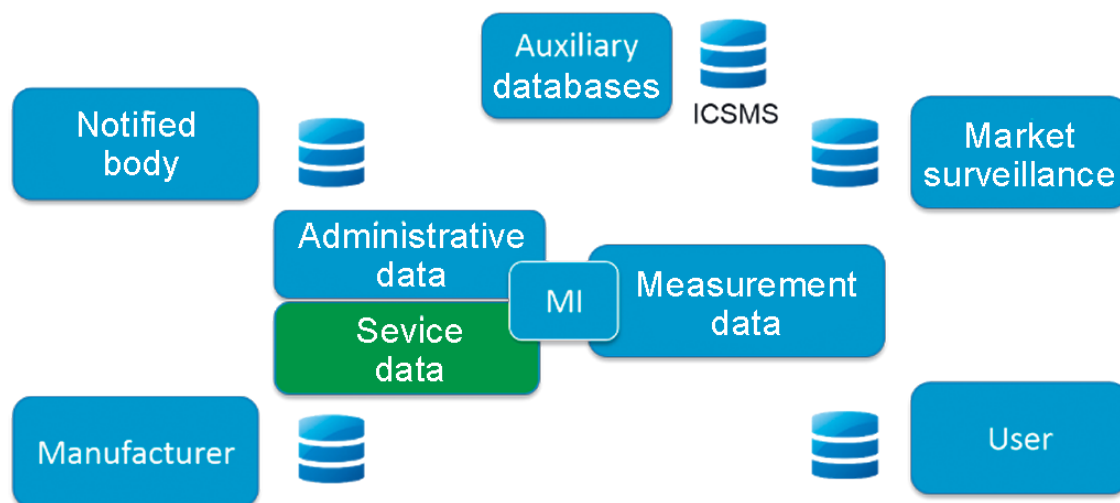


Figure 8: The use cases for the digital “support of repair” and the “support of verification” as well as the “streamlining of software maintenance” based on pretesting or verification of parts.

Figure 9: Major data sources available from the stakeholders and the measuring instrument (MI) which could be part of the metrological data lake. ICSMS: information and communication system for pan-European market surveillance. Auxiliary pan-European and national databases are also shown.



and investigated to extract knowledge to propose the potential creation of smart data services.

Concurrently, we will focus on those services that all stakeholders consider the most beneficial to be supported digitally. These are the usage of **service data as added value** for market surveillance and the introduction of smart data concepts in legal metrology, e.g. **smart contracts**. Such smart contracting, i.e. the initiation of a process based on the fulfilment of conditions or the availability of information, will also help to simplify and speed up several processes where several partners are involved.

How the information originated from the market can be incorporated into the risk assessment method proposed by WELMEC WG7 is an open question. But both the experiences from manufacturers of measuring instruments, obliged to collect such information, and from the market surveillance bodies and their own national databases will aid a European incident database that will be potentially used via the trustworthy metrology core platform, to **close the risk assessment** loop between design, and the market and provide useful new information to all stakeholders.

In order to ensure efficient exchanges of information among authorities in the EU, an online platform (Information and Communication System on Market Surveillance, ICSMS) has been established. This platform helps market surveillance authorities exchange information, but also serves purposes of consumer information. It offers the public information about exceeded limit values and non-conformity with substance prohibitions. In addition, consumers can use the platform's search tool to research the national authorities responsible for market surveillance based on product type and location. Such databases and platforms provided on the national and the European level should be included as well.

5 Expected impact

The role of digital networks as an accelerator of development has been recognized globally, and due to its critical importance to the three pillars of development – economic development, social inclusion and environmental protection – the task of making the Internet universal and affordable was approved as a target of the United Nations' Sustainable Development Goals, echoing the objective already elaborated by the United Nations' Broadband Commission for Sustainable Development [OECD2017]. At this still early stage, legal metrology may have a unique opportunity to help usher in the IoT, an enabling environment that both promotes its many benefits and addresses the challenges.

5.1 Impact on the industrial community

The envisioned early impact of this project on the industrial community is aimed at **driving innovation** in legal metrology and facilitating new or significantly improved regulated measuring instruments through exploiting knowledge in the European measurement institutes. These innovations will improve competitiveness and sustainability, and enable the digitization of European industry active in legal metrology and will lead to increased economic turnover.

The realization of the trustworthy metrological core platform is designed for aggregation of existing data and infrastructures of the participating stakeholders to demonstrate the feasibility of the approach and is the foundation for a realistic concept for a pan-European IT infrastructure for legal metrology. The participating manufacturers and other stakeholders in legal metrology benefit from the **advantage of being the first** to set up, test, use and amend this infrastructure, e.g. to speed up existing processes and therefore reduce downtime of the instruments – which can sum

up to several hundred thousand euros per day for instruments installed in high throughput industrial production – and improve service quality while saving costs and using their limited personnel resources more effectively.

This will set up an initial quality infrastructure for data to prove the feasibility of the approach and to allow other infrastructures to easily join it. Concurrently, reference architectures will be made available for the highest priority technologies, such as IoT devices, cloud computing or intelligent meters. The developed reference architectures will streamline risk assessment and verification in the field, thus helping SMEs to take part or even enter the digital market faster. Data which provide added value in legal metrology will reduce governmental burdens, and a realistic dynamic risk assessment concept will reduce the cost of the required security implementation down to an adequate level.

Based on these reference architectures, metrological IT services will be made available, such as remote verification and the maintenance of measuring instruments (as the foundation for many other possible services). Data obtained from the administrative data and the service of each individual measuring instrument in service (and of all instruments of the same type) throughout its life cycle will be used to provide smart, data-based metrological services to stakeholders with the aim of optimizing administrative processes. These architectures and services lay the foundation for the advancement of the quality infrastructure created within this project and serve as an attractor for further NMIs, manufacturers and verification authorities throughout Europe.

5.2 Impact on the metrological communities

This initiative enables and promotes collaborative work in the most demanding fields of industrial metrology going beyond the state of the art. It will strengthen the **mutual cooperation of European NMIs**, leading to a **coordinated digital European metrology infrastructure** increasing cohesion within Europe. The reference architectures which will be developed within the course of the initiative will offer the European notified bodies solutions which are in line with the legal framework and provide market surveillance with easy verification methods to support their task without the need of in-depth expertise in the method. It will impact on the development of conformity assessment done by notified bodies and NMIs which carry out type approval, on authorities responsible for market surveillance or verification of instruments in use through the provision of harmonized digital services. This will significantly influence the way

manufacturers, market surveillance authorities and notified bodies interact, and establishes a harmonization of procedures on a higher technological level setting up a unified quality standard.

On a broad scope, the initiative will strengthen the collaboration of European NMIs and will increase their competitiveness with NMIs outside Europe. In the area of metrological IT, knowledge transfer between NMIs will support the **building of capacity regarding new technologies**. Secondly, market surveillance and verification authorities will also gain improved services from the platform which will avoid the high costs and associated downtime associated with the verification and in-service control of the instruments abroad. It will also increase the market surveillance's verification capabilities. Furthermore, European industry may use the results of the research as support when new measuring instruments and measuring systems are to be designed.

5.3 Impact on relevant standards

The industrial project partners or collaborators are the most direct and immediate up-takers. They will incorporate the outcome in their current and future work, spreading it to their customers and users. The initiative is designed such that the relevant standardization committees for software in legal metrology (WELMEC WG 7 “*Software*” and OIML TC5/SC2 “*Software*”) will be informed about its progress. In that way, these committees will be actively involved to recommend further steps or investigations aiming for more beneficial results for all partners. Furthermore, this project is actively promoting the circulation of the following fundamental European and international guidance documents for software and ICT: WELMEC 7.2:2015 *Software Guide* and OIML D 31:2008 *General requirements for software controlled measuring instruments*. These harmonized standards will be amended with the help of the findings of the project.

These implications may for example be:

- the redefinition of risk classes according to the achieved results and their impact on the instrument-specific annexes of WELMEC Guide 7.2.,
- changes to the device classification,
- the introduction of module-related risk classes,
- an Annex for WELMEC Guide 7.2 and OIML D31 containing the reference architectures.

5.4 The long-term economic impact

The European manufacturers active in legal metrology will benefit directly from this initiative,

for supporting the digital transformation of legal metrology will ensure that this sector will contribute with its actual share of the GDP of up to 6 % [DP2015] to the 250 billion euros the European Commission expects with cloud-friendly policies [IDC2012]. After its initial three-year phase, the concept for a pan-European IT infrastructure will be expanded by incorporating other existing infrastructures and, where possible, amended to include the opportunities presented by the developed reference architectures and the technology- and data-based metrological services. Industrial and other users are expected to take up the findings in a very short time towards the end of the project or soon after its completion. This is assured by the partners of the consortium and by those who will actively participate in a **stakeholder advisory board**.

The harmonized standards will be amended with the help of the findings of the initiative. By doing so, beneficial concepts and findings will be made available internationally. The OECD [OECD2017] also recommends that governments should consider **updating laws** to address factors that unnecessarily make working through online platforms less attractive: the lack of clarity in certain regulations, tax issues that emerge with the proliferation of small revenues earned via platforms, and consumer and privacy protection of online participants. Therefore, the outcomes of this project will be used to demonstrate that new concepts are in line with the aims of protection of the New Approach and should be used to initiate processes to **future proof legislation** and to **reduce governmental burdens**.

5.5 Social impact

One focus of legal metrology is to protect the consumer and user of a measuring instrument. The possibilities new technologies offer allow novel concepts for measuring instruments which the manufacturers intend to apply. Contemporary measuring instruments are in most cases “concentrated” systems comprising all of their features at the measuring site or close by. The development of measuring instruments, in view of the emerging technologies, is steering towards a “dissociated” instrument, where externalization is applied, i.e. parts are made available by virtualization. The base technologies and concepts for this change have matured in a way which requires more than an intuitive understanding to have **confidence in their correct functionality**. The growth of digital security risks to economic and social activities, including risks to the security of data assets, as well as concerns that privacy and personal data protection is being violated, reinforces the importance of the lack of trust in digital technologies and activities as another barrier to the adoption and use

of digital technologies by firms, households and across society. These concerns will only become stronger with the introduction of newer, more advanced technologies and processes (e.g. cloud computing, data analytics, IoT) that will in turn raise additional challenges – most notably related to safety and liability. Therefore, to establish confidence in the correctness of measurements, there must be methods in place which guarantee an adequate level of security the consumer can trust in. At the same time, institutions, i.e. the notified bodies and NMIs, need to be able to guarantee this level. Only by establishing such methods, can confidence and acceptance of new technologies in the market be guaranteed. The initiative addresses this challenge, e.g. with the reference architectures.

At the same time, digital technologies are creating new opportunities for **skill development**. Seizing these opportunities requires a process of institutional learning, where actors in the field of legal metrology are given sufficient scope to experiment with new tools and the systematic assessment of outcomes leads to the selection of the most effective practices. This project will deliver such possibilities. Barriers to accessing these new technologies will be identified and addressed throughout the course of the initiative.

6 The initial consortium

For the quality and efficiency of the implementation, it is vital that the consortium engages all relevant stakeholder groups active in legal metrology on the European level, uses their knowledge, addresses their needs and makes the initiative’s results accessible to them. Therefore, the initial consortium – which is coordinated by PTB – has gathered several NMIs deeply involved in conformity assessment and the certification of measuring instruments subject to legal control as notified bodies and/or as verification and inspection authorities (Germany (PTB), France (LNE), UK (NPL), Switzerland (METAS), Sweden (RISE), Czech Republic (CMI), Austria (BEV-PTP), Spain (CEM), and Portugal (IPQ)). Furthermore, these institutions and further collaborators (Ireland (NSAI), The Netherlands (Agentschap Telecom)) are also active as market surveillance authorities and verification bodies bringing in their expertise from measuring instruments in use. Consequently, the practical experiences from industries developing measuring instruments should be regarded as well. Five European manufacturers’ associations representing a relevant amount of measuring instruments in Europe, AQUA, CECIP, CECOD, FARECOGAZ, AQUA and VDMA will provide their expertise from the manufacturers’ point of view and will guarantee that the solutions developed in this project are on a general level,

so that whole classes of instruments will benefit from them. Nonetheless, to incorporate the link to real measuring instruments, the participation of individual manufacturers is inevitable and is guaranteed by the participation of *Sartorius*, *Bizerba*, *Espera-Werke* and *Diehl Metering* which will develop demonstrators for different instrument classes within the course of the project. It will be the combined effort of the partners with technical and scientific excellence in all aspects of this initiative that will generate powerful synergies and lead to the successful conclusion of this joint research project. The scientific challenges which arise with the objectives of the initiative need competent partners which complement the expertise in the area of security and data science. Therefore, the chair for “Security in Telecommunications” (SECT) and the Berlin Big Data Center (BBDC), both from the Technical University of Berlin (TU Berlin), Germany, are taking part in the initiative. The Berlin Big Data Center pools expertise in scalable data management, data analytics, and big data applications, along with conducting fundamental research to develop novel and automatically scalable technologies capable of performing a “deep analysis” of “big data”. The chair for “Security in Telecommunications” is part of the Telekom Innovation Laboratories, an institute of TU Berlin which closely collaborates with Deutsche Telekom AG. Research topics of SECT include virtualization technology, mobile communication standards, invasive and non-invasive circuit analysis and fault injection methods, cloud security, and physically unclonable functions.

Furthermore, TU Berlin, Faculty for Electrical Engineering and Computer Science, Institute of Software Engineering and Theoretical Computer Science and PTB have established the position of a Junior Professorship for the field of “Secure and trustworthy network connected system architectures”. The position includes the leading a newly established junior research group at PTB. The position will be filled with a highly-motivated scientist by early 2018. The working field will be the development and implementation of excellent and highly innovative premarket research in the field of secure and trustworthy ICT systems in legal metrology. The commercial as well as social need for a contemporary applicability of novel technological approaches will be taken into account. The Junior Professorship is associated with the SECT group of Prof. Dr. J.-P. Seifert at TU Berlin.

7 Comparison with other European approaches

Due to current developments on the European level, the European Open Science Cloud (EOSC) [COM/EOSC], it seems appropriate to address the

question of how our approach could learn from this activity.

There is a rapidly growing, worldwide consensus in the scientific community among science funders and policy makers that the transition to truly data-driven open science can only be achieved when we collectively build a globally interoperable research infrastructure. According to the EOSC report [COM/EOSC2016], this should be a “federated, globally accessible environment where researchers, innovators, companies and citizens can publish, find and re-use each other's data and tools for research, innovation and educational purposes”.

Keeping in mind that in legal metrology, a restricted community exchanges sensitive information regarding regulated measuring instruments within legally guided processes to guarantee confidence in the correctness and traceability of the measurements and to protect the customer, it becomes obvious that the aims in the European metrology cloud (EMC) approach and the EOSC approach diverge.

Nonetheless, both concepts are based on a similar foundation: using existing infrastructures and databases and joining them via an appropriate platform. By providing innovative products which fully benefit from these merged elements via this platform, the EMC goes beyond this similarity. Furthermore, the standardization approach according to the “hourglass model” [COM/EOSC2016] with minimal, rigorous standards and protocols and maximum freedom of implementation is inherent in both concepts. It will allow all stakeholders to start implementing prototype applications for the sharing of data and services and for the secure and reliable exchange of data to ensure the seamless flow of information among devices from multiple vendors.

Therefore, we will follow the EOSC initiative and consider, where appropriate, their findings in the European metrology cloud.

8 Summary

To foster the digital transformation in legal metrology, PTB has initiated the development of a coordinated European digital quality infrastructure for innovative products and services; the “*European metrology cloud*”. Its foundation lies in a trustworthy metrological core platform in each Member State, designed to support and streamline regulatory processes by joining existing infrastructures and databases and to provide a single point of contact for all stakeholders. Within this quality infrastructure, reference architectures, i.e. innovative measuring instruments, as well as technology- and data-driven digital services for legal metrology will be developed. The first outcomes

of this initiative will be demonstrators to serve as blueprints for the individual national platforms to attract further stakeholders and services to be integrated and provide results to support or even initiate processes to future proof national and European legislation. These platforms can later be combined via a coordinating platform established and maintained by a board of Member States, authorities and industrial stakeholders. With these objectives, the initiative fosters the digital single market envisioned by the European Commission.

References

- [AGME2014] *Eichstatistik I des Jahres 2014* (Verification statistics 2014), <http://www.agme.de>. (Last accessed: 28.09.2017).
- [BR2014] *Digitale Agenda 2014-2017*, https://www.digitale-agenda.de/Webs/DA/DE/Home/home_node.html. (Last accessed: 28.09.2017).
- [COM2010] *Interim Evaluation of the Measuring Instruments Directive – Final report – July 2010*, <http://ec.europa.eu/DocsRoom/documents/6584/attachments/1/translations>. (Last accessed: 28.09.2017).
- [COM2014/25] *A vision for the internal market for industrial products*, European Commission, COM (2014), [http://cor.europa.eu/en/activities/stakeholders/Documents/Com %202014-25.pdf](http://cor.europa.eu/en/activities/stakeholders/Documents/Com%202014-25.pdf). (Last accessed: 28.09.2017).
- [COM2014/442] *Towards a thriving data-driven economy*, European Commission, <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/communication-data-driven-economy>. (Last accessed: 28.09.2017).
- [COM2014/442] *Regulation (EU) No 910/2014 [COM2014/910] of the European Parliament and of the Council on electronic identification and trust services for electronic transactions in the internal market*. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0910&from=EN>. (Last accessed: 28.09.2017).
- [COM2015/192] *A Digital Single Market Strategy for Europe*, European Commission, 2015, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52015DC0192>, 2015, [http://cor.europa.eu/en/activities/stakeholders/Documents/Com %202014-25.pdf](http://cor.europa.eu/en/activities/stakeholders/Documents/Com%202014-25.pdf). (Last accessed: 28.09.2017).
- [COM2016/C272] *Commission Notice – The ‘Blue Guide’ on the implementation of EU products rules 2016*, <http://ec.europa.eu/DocsRoom/documents/18027>. (Last accessed: 10.10.2017).
- [COM2016/288] *Communication from the Commission, Online Platforms and the Digital Single Market Opportunities and Challenges for Europe*, 2016, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52016DC0288&from=EN>.
- [COM2017] *Innovation*, European Commission, https://ec.europa.eu/growth/industry/innovation_en. (Last accessed: 28.09.2017).
- [COM/EOSC] *The European Open Science Cloud*, <https://ec.europa.eu/research/openscience/index.cfm?pg=open-science-cloud>. (Last accessed: 28.09.2017).
- [COM/EOSC2016] *First report of the Commission High Level Expert Group on the European Open Science Cloud*, 2016, https://ec.europa.eu/research/openscience/pdf/realising_the_european_open_science_cloud_2016.pdf#view=fit&page-mode=none. (Last accessed: 28.09.2017).
- [COM/MS] *The implementation of market surveillance in Europe*, http://ec.europa.eu/growth/single-market/goods/building-blocks/market-surveillance/organisation_de. (Last accessed: 28.09.2017).
- [COM/NANDO] *New Approach Notified and Designated Organisations (Nando) Information System*, <http://ec.europa.eu/growth/tools-databases/nando/>. (Last accessed: 28.09.2017).
- [DP2015] D. Peters, M. Peter, J.-P. Seifert and F. Thiel: *A Secure System Architecture for Measuring Instruments in Legal Metrology*, *Computers* (2015); 4(2):61–86. doi:10.3390/computers4020061.
- [ENG04] EMRP Project ENG04: *Metrology for Smart Electrical Grids*, <http://www.npl.co.uk/science-technology/mathematics-modelling-and-simulation/research/data-analysis-and-uncertainty-evaluation/metrology-for-smart-electrical-grids>. (Last accessed: 28.09.2017).
- [ENG63] EMRP Project ENG63: *Metrology for Smart Electrical Grids, Sensor network metrology for the determination of electrical grid characteristics*, <http://www.gridsens.eu/Default.aspx>. (Last accessed: 28.09.2017).

- [EUST2017] Eurostat, *Statistics Explained, Statistics on small and medium-sized enterprises*, http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Statistics_on_small_and_medium-sized_enterprises. (Last accessed: 10.10.2017).
- [FT2015] F. Thiel, M. Esche, D. Peters, U. Grottker: *Cloud Computing in Legal Metrology*, 17th International Congress of Metrology, 16001 (2015), DOI:10.1051/metrology/201516001, EDP Sciences (2015).
- [ME2105] M. Esche, F. Thiel: *Software Risk Assessment for Measuring Instruments in Legal Metrology*, in Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems, Vol. 4, Lodz, Poland, September 2015.
- [M/441] *Mandate from the KOM to CEN, CENELEC and ETSI to development an open architecture for utility meters involving communication protocols enabling interoperability*, 2009, [http://www.etsi.org/images/files/ECMandates/m441 %20EN.pdf](http://www.etsi.org/images/files/ECMandates/m441%20EN.pdf). (Last accessed: 28.09.2017).
- [M/490] *Standardization Mandate to European Standardisation Organisations (ESOs) to support European Smart Grid deployment*, 2011, https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2011_03_01_mandate_m490_en.pdf. (Last accessed: 28.09.2017).
- [OECD2017] *Key Issues for Digital Transformation in the G20, Report prepared for a joint G20 German Presidency / OECD conference*, OECD (2017), <http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/G/g20-key-issues.html>. (Last accessed: 28.09.2017).
- [BSI/OPC/2017] *Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA)*, Security Analysis, BSI (2017) https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/EN/BSI/Publications/Studies/OPCUA/OPCUA.pdf?__blob=publicationFile&v=2. (Last accessed: 28.09.2017).
- [OPCF2017] *OPC Foundation, Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA)*, <https://opcfoundation.org/about/what-is-opc/>. (Last accessed: 28.09.2017).
- [IDC2012] IDC: *Quantitative Estimates of the Demand for Cloud Computing in Europe and the Likely Barriers to Take-up*, (2012). Available for download from: <http://cordis.europa.eu/fp7/ict/ssai/docs/study45-d2-interim-report.pdf>. (Last accessed: 28.09.2017).
- [IT2017] I. Turner: *Recent Software Developments – The view of the weighing industry*, PTB-Mitteilungen, 1/2017, page 3–6, doi: 10.7795/310.20170199.
- [PC2017] P. Cloutier, J. Meurer: *CECOD vision of “New Big Data World” with metrology constraints*, PTB-Mitteilungen, 1/2017, page 7–8. doi: 10.7795/310.20170199.
- [WP2017] *Economy of the European Union*, https://en.wikipedia.org/wiki/Economy_of_the_European_Union. (Last accessed: 28.09.2017).

Software and ICT-related Challenges in Legal Metrology

Florian Thiel¹

IT technologies have evolved significantly over the past ten years – namely embedded systems, the Internet of Things (IoT), cyber physical systems, cloud computing and big data concepts. These have converged into completely new technology fields like the industrial Internet and smart services. These fields offer technology- and data-driven possibilities which can be exploited for the benefit of all stakeholders in legal metrology, e.g. to reduce development costs, overcome typical barriers to innovation, and speed up the time to market of new products.

We therefore thought it was high time to once again bring together all stakeholders in legal metrology to discuss the challenges and opportunities the digital single market offers.

Following our two successful workshops on *Operating Systems in Measurement Instruments and Other Software Problems in Legal Metrology and the Protection of Measurement Data in legal metrology and Related Challenges*, which were very well received by the international metrological community, we offered another two-day workshop entitled *Software and ICT-related Challenges in Legal Metrology* on 21 and 22 June 2017. This covered contemporary challenges and chances regarding software and IT in legal metrology under the guiding theme:

Advanced technology meets daily practice.

The workshop was chaired by Florian Thiel from PTB, the convener of the WELMEC Working Group 7 “Software”, and assisted by Marko Esche secretary for the chairmanship of OIML TC 5/SC 2 “Software”, as well as further colleagues from PTB.

About 130 participants from all over Europe as well as from China, Japan, Africa and South America attended this workshop, which was supported by OIML, WELMEC and the Helmholtz Fonds e.V. and was organized by PTB’s department 8.5 “Metrological IT”.

The aim of this workshop was to bring together experts from different technical disciplines as well as representatives from industry, science, testing authorities, notified bodies and regulatory authorities to discuss challenges, approaches and solutions concerning IT-related metrological issues.

At its 51st meeting in October 2016, under Resolution No. 2016/20 (Agenda Item 9.1.2.2), the CIML approved – as a new project in TC 5/SC 2 “Software” – the revision of OIML D 31:2008 General requirements for software controlled measuring instruments. This workshop offered the opportunity to identify and discuss items that are considered relevant enough to be introduced in a revision of WELMEC Guide 7.2 Software and a revision of OIML D 31.

Stakeholder needs

The workshop was oriented directly towards stakeholders’ needs since its form and topics were directly derived from the result of a survey among all WELMEC members which was confirmed by WELMEC WG 7 Software. The needs of market surveillance in particular were addressed. Many experts, such as representatives of industry (e.g. CECIP and CECOD), notified bodies, the European Commission, EURAMET, etc., contributed actively to the discussions. All these contributions, together with contributions from PTB, formed the skeleton of the workshop which steered both discussions and the finding of solutions and opportunities.

Relevance for other regulated areas

The topics covered by the workshop also attracted the attention of manufacturers from other regulated areas. The major manufacturers of cash gaming machines, which are also subject to legal control, also attended the workshop to see if the ideas presented to secure data systems are transferable.

¹ Dr. habil. Florian Thiel, Department “Metrological Information Technology”, e-mail: florian.thiel@ptb.de

Results

The workshop showed again the need for conforming solutions covering new technologies. Such reference architectures for the basic technologies like embedded devices (IoT), distributed instruments, the development of general and instrument-specific reference architectures, e.g. for weighing instruments, heat meters, fuel dispensers, etc. are required. These general and instrument-specific reference architectures must encompass the fulfilment of the essential requirements, a verification method which provides easy inspection of a meter on the market and an adequate risk analysis which considers contemporary threats. For the latter, attack vectors, i.e. a scheme on how these threats could be realized, are needed to guarantee the comparability of the analysis between the manufacturers and the notified bodies.

This is considered the most effective way that the “knowledge gap” between the manufacturers and the regulative bodies could be bridged and furthermore will streamline the process of conformity assessment and verification in the field.

During the course of the workshop, PTB offered several such solutions, e.g. for IoT devices, cloud computing and a procedure for risk assessment which is already in use.

Publication of presentations

The workshop’s presentations are available at the following PTB website:

<http://www.ptb.de/cms/en/ptb/fach-abteilungen/abt8/fb-85/nicht-im-menue/publications-and-events/3rd-workshop-software-and-ict-related-challenges-in-legal-metrology.html>



Figure 1:
Picture of the workshop’s participants.

Bericht über die 52. Sitzung des CIML in Cartagena de Indias, Kolumbien

Roman Schwartz¹, Peter Ulbig²

Oberstes Ziel der 1955 gegründeten „*Organisation Internationale de Métrologie Légale*“ (OIML) mit 128 Mitgliedstaaten ist es, die Vielzahl der nationalstaatlichen Rechtsvorschriften und messtechnischen Prüfungen von Messgeräten international zu harmonisieren, für die gegenseitige Anerkennung von Prüfergebnissen in den Mitgliedsländern zu sorgen und damit technische Handelshemmnisse im Sinne der WTO (*World Trade Organization*) abzubauen. Betroffen sind viele eichpflichtige Messgeräte, wie zum Beispiel Waagen, Zapfsäulen, Gas-, Wasser- und Elektrizitätszähler, aber auch Längenmessgeräte, Geschwindigkeitsmessgeräte zur Verkehrsüberwachung und Taxameter.

Die OIML hat zurzeit 62 Mitgliedstaaten und 66 korrespondierende Mitgliedstaaten.

Kambodscha ist seit diesem Jahr neues Mitglied; Bolivien, Ecuador und die Philippinen sind neue Korrespondierende Mitglieder.

Die 52. Sitzung des Internationalen Komitees für Gesetzliches Messwesen (CIML) fand vom 10. bis 12. Oktober 2017 in Cartagena de Indias, Kolumbien, statt.

Im Vorfeld der CIML-Sitzung wurde ein eintägiges Seminar abgehalten, das über das neue OIML-Zertifizierungssystem (*OIML Certification System* = OIML-CS) informierte, welches ab 1.1.2018 in Kraft treten wird.

An der 52. CIML-Sitzung nahmen 115 Teilnehmer aus 42 Mitgliedstaaten und 9 korrespondierenden Mitgliedstaaten teil. Zur deutschen Delegation gehörten neben den o. g. Autoren auch Herr Johann Fischer, Direktor des Landesamts für Mess- und Eichwesen Berlin-Brandenburg, sowie Frau Katharina Gierschke, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi).

Alle Beschlüsse der 52. CIML-Sitzung können auf den Internetseiten der OIML aufgerufen werden [1, 2].

Die wichtigsten Entscheidungen und Entwicklungen werden nachfolgend vorgestellt.

1. Zusammenarbeit mit anderen Organisationen

Vertreten waren auch wieder der europäische Herstellerverband für Waagen (CECIP) und das Internationale Büro für Maß und Gewicht (BIPM). Am Roundtable der regionalen Organisationen für gesetzliches Messwesen (RLMO) nahmen Vertreter von AFRIMETS (*Intra-Africa Metrology System*), APLMF (*Asia-Pacific Legal Metrology Forum*), GULFMET (*Gulf Association for Metrology*), WELMEC (*European Cooperation in Legal Metrology*), COOMET (*Euro-Asian Cooperation of National Metrological Institutions*) und SIM (*Sistema Interamericano de Metrologia*) teil.

2. OIML-CS

Das CIML verabschiedete die erste Revision des Rahmendokuments B 18 *Framework for the OIML Certification System* (OIML-CS). Das neue OIML-Zertifizierungssystem, das am 1. Januar 2018 in Kraft treten wird, hat zum Ziel, die weltweite Anerkennung von OIML-Prüfberichten für deutlich mehr Messgerätearten und Teilnehmerländer als bisher zu erreichen. In früheren CIML-Sitzungen war beschlossen worden, die beiden parallel existierenden OIML-Zertifizierungssysteme, das Basis- und das MAA (*Mutual Acceptance Arrangement*)-Zertifizierungssystem zu einem einzigen Zertifizierungssystem zusammenzuführen. Beide bisher gültigen Zertifizierungssysteme werden nach Beschluss des CIML nun zum 31. Dezember 2017 eingestellt. Die bisherigen OIML-Basis- und MAA-Zertifikate sollen aber ihre Gültigkeit behalten.

Das neue OIML-CS wird schrittweise für möglichst viele Messgerätearten eingeführt bzw. ausgebaut. Ab 1.1.2018 gilt es zunächst für nicht-selbsttätige Waagen (R 76) und Wägezellen (R 60), ab 1.1.2019 folgen dann E-Zähler (R 46), Wasserzähler (R 49), selbsttätige Kontrollwaagen (R 51), Messgeräte für Flüssigkeiten außer Wasser (R 117)

¹ Hon.-Prof. Dr. Roman Schwartz, Vizepräsident der PTB, Präsident des Internationalen Komitees für Gesetzliches Messwesen (CIML)

² Dr. Peter Ulbig, Abteilungsleiter Gesetzliche und Internationale Metrologie

und Gaszähler (R 137). Ab 1.1.2020 folgen Taxameter (R 21), Förderbandwaagen (R 50), selbsttätige Waagen zum Abwägen (R 61), Wärmehändler (R 75), Füllstandsmesser für Flüssigkeits-Lagerbehälter (R 85), Abgasmessgeräte (R 99), selbsttätige Gleiswaagen (R 106) und totalisierende Behälterwaagen (R 107), Mehrdimensionsmessgeräte (R 129), selbsttätige Straßenfahrzeugwaagen (R 134) und CNG-Gasmessgeräte (R 139) [siehe 2, Resolution No. 2017/20]. Weitere Messgerätearten werden dann in das OIML-CS aufgenommen, wenn es entsprechende neue oder überarbeitete OIML-Empfehlungen in der Standardstruktur mit den drei Teilen Messgeräteanforderungen, Prüfverfahren und Prüfberichte gibt.

Das 2017 eingesetzte „*provisional Management Committee*“ (prMC) wurde nach Verabschiedung aller von ihm erarbeiteten Dokumente aufgelöst und die Einrichtung eines „*Management Committee*“ (MC) als zentrales Steuer-, Lenkungs- und Koordinierungsgremium des neuen OIML-CS ab 1. Januar 2018 beschlossen. Zum Vorsitzenden des MC wurde Cock Oosterman (NMI, NL) und zum Vorsitzenden des „*Board of Appeal*“ Roman Schwartz (PTB, DE) ernannt.

Um ab 1.1.2018 OIML-CS-Zertifikate und – Prüfberichte ausstellen zu können, müssen interessierte Mitgliedsländer dem Internationalen Büro für Gesetzliches Messwesen (BIML) mitteilen, für welche Messgerätearten sie „*Issuing Authority*“ werden möchten und entsprechende Kompetenznachweise nach ISO/IEC 17065 und 17025 einreichen.

Mitgliedsländer ohne eigene Prüfmöglichkeiten können als „*Utilizer*“ an dem Zertifizierungssystem teilnehmen und haben damit die Möglichkeit, im MC mit vollem Stimmrecht mitzuarbeiten.

3. Countries and Economies with Emerging Metrology Systems (CEEMS)

Mit der Verabschiedung des OIML-Dokuments B 19 *Terms of Reference for the Advisory Group on matters concerning Countries and Economies with Emerging Metrology Systems* wurde ein beratendes Komitee (*Advisory Group*) zur Unterstützung von Entwicklungsländern konstituiert. Zum Vorsitzenden dieses Komitees wurde das ehemalige CIML-Mitglied Chinas, Herr Pu, ernannt, zum stellvertretenden Vorsitzenden (*Acting Chair*) der ehemalige CIML-Präsident, Peter Mason (UK). Das Dokument B 19 beschreibt die Rolle, Funktion, Zusammensetzung und Arbeitsweise der CEEMS-Beratergruppe.

4. OIML-Publikationen

Wichtigste Arbeitsgrundlage für alle technischen Aktivitäten in den Technischen Komitees (TCs), Subkomitees (SCs) und Projektgruppen (PG) der OIML ist das Dokument B 6 *Directives for OIML Technical Work*. Eine Revision dieser Richtlinie wurde dieses Jahr verabschiedet mit folgender Vereinbarung:

- Nach drei bis fünf Jahren werden die *Technical Directives* evaluiert, um zu bewerten, ob sie den Entwicklungsprozess für neue und zu revidierende OIML-Publikationen tatsächlich beschleunigen und die Arbeit in den PG effizienter machen.
- Im Falle der Entwicklung, Überarbeitung oder Ergänzungen von Basispublikationen (B) entscheidet das CIML über die Anwendung der technischen Richtlinien. Alle zukünftigen Arbeiten an Basispublikationen sollen dem CIML zunächst in Form von Projektvorschlägen zur Abstimmung vorgelegt werden.

Folgende überarbeitete OIML-Empfehlungen wurden verabschiedet:

- R 60 *Metrological regulation for load cells*
- R 61 *Automatic gravimetric filling instruments*
- R 80 *Road and rail tankers with level gauging*

Folgenden neuen Projekten wurde zugestimmt:

- Entwicklung einer neuen Basispublikation *Rules for the use of the OIML and OIML-CS logos* durch das BIML
- Revision des Dokuments OIML D 1:2012 *Considerations for a Law on Metrology durch die CEEMS-Beratergruppe*
- Revision des OIML-Dokuments OIML D 2:2007 *Legal units of measurement im TC 2 Units of measurement*

Alle aktuellen Fassungen der OIML-Publikationen stehen auf den OIML-Webseiten zum Download zur Verfügung [3].

5. Personalien und Ehrungen

Roman Schwartz wurde einstimmig mit sofortiger Wirkung für eine Amtszeit von sechs Jahren zum neuen Präsidenten des CIML gewählt.

Paul Dixon wurde für eine Amtszeit von fünf Jahren zum *Assistant Director* des BIML gewählt.

Die OIML-Auszeichnung für „exzellente Beiträge von Entwicklungsländern zum gesetzlichen Messwesen“ ging dieses Jahr an die kolumbianische Aufsichtsbehörde für Industrie und Handel (SIM) und an das Direktorat des *National Metrology Institute of Malaysia* (NMIM).

In Anerkennung seiner Verdienste als CIML-Präsident von 2011 bis 2017 wurde Peter Mason (UK) die OIML-Ehrenmitgliedschaft übertragen. Den Titel *Member of Honor* erhielt auch Alan Johnston als CIML-Mitglied Kanadas in Anerkennung seiner mehr als 23-jährigen Verdienste um die OIML, unter anderem als CIML-Präsident von 2005 bis 2011.

6. Termine

Die 53. CIML-Sitzung wird vom 9.-12. Oktober 2018 in Hamburg stattfinden.

Weitere OIML-Veranstaltungen und Termine finden sich auf der OIML-Webseite unter [4].

7. Referenzen

- [1] <https://www.oiml.org>
- [2] <https://www.oiml.org/en/structure/ciml/pdf/52-ciml-resolutions-english.pdf>
- [3] <https://www.oiml.org/en/publications/introduction>
- [4] <https://www.oiml.org/en/events/calendar>



Organisation Internationale de Métrologie Légale

International Organization of Legal Metrology



52nd CIML MEETING

Cartagena de Indias, Colombia. 9-12 October 2017

Bild 1:

Teilnehmer der 52. Sitzung des Internationalen Komitees für Gesetzliches Messwesen (CIML) in Cartagena, Kolumbien

Mehr Sicherheit für Messgeräte durch Hash-basierte Prüfung

Nach dem neuen Mess- und Eichgesetz muss die Software in einem Messgerät regelmäßig auf Datenintegrität überprüft werden. PTB-Forscher entwickelten für diese Überprüfung ein sicheres Verfahren: Genutzt wird dabei anstatt einer herkömmlichen Checksummen-Berechnung eine robustere Hash-Überprüfung mittels Separationskernen. Das garantiert mehr Sicherheit gegen Manipulationen durch intelligente Schadsoftware und spart Platz für das Speichern der Dateisystemstruktur. Für die geplante Überprüfung von Messgeräten über riskante, offene Netzwerke, z. B. über Cloud-Systeme, gewährleistet das neue PTB-Verfahren eine ausreichende Daten-Sicherheit. Umständliche Vorort-Prüfungen könnten somit völlig entfallen.

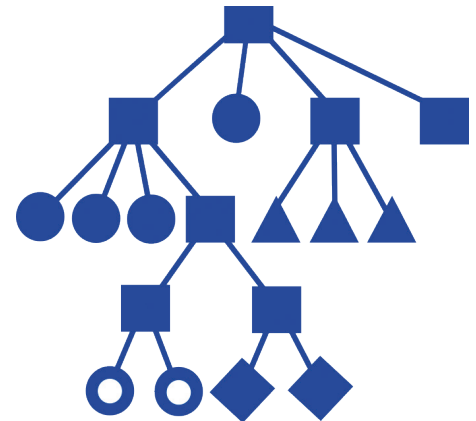
Intelligente Schadsoftware kann sich während herkömmlichen Dateintegritätsprüfungen verstecken und vorgenommene Änderungen an z.B. Messdaten verbergen. Vor allem bei Messgeräten, die im gesetzlichen Messwesen behandelt werden, ist die Sicherheit der Daten zu gewährleisten. Voraussetzung für die neue PTB-Prüfung ist die Installation eines sicheren Mikrokerns (oft auch Separationskern genannt) innerhalb des Messgerätes. Dieser kann über virtuelle Maschinen jede ausgelagerte Datei aus realen oder virtuellen Geräten kryptografisch sichern und verhindert damit ungewollte Manipulationen. Da die Speicherkapazität von eingebetteten Systemen wie Messgeräten oft begrenzt ist, werden Datenreduktionsalgorithmen, wie das von der PTB entwickelte FLOODS (Filesystem Level Order Unary Degree Sequence), angewendet (s. Bild).

Wirtschaftliche Bedeutung

Potenziell können alle Messgeräte, bei denen gesetzliche Anforderungen zur sicheren Auswertung und Archivierung der Messdaten erforderlich sind, mit dem neuen Prüfverfahren ausgestattet werden. So können z. B. Vorort-Prüfungen mit komfortableren Server-Cloud-Lösungen ersetzt werden.

Entwicklungsstand

Das Verfahren wurde ausführlich getestet. Das deutsche Patent ist unter der Nummer DE 10 2016 110 479 A1 offengelegt. Bei Interesse bieten wir Ihnen an, dieses Verfahren in gemeinsamen Projekten weiterzuentwickeln oder direkt zu lizenzieren.



Prinzip der Kodierstruktur von FLOODS, die eine Erweiterung auf beliebige Arten von Objekten ermöglicht und platzsparender im Vergleich zu pointerbasierten Verzweigungs-bäumen ist. Die Symbole stellen reale oder virtuelle Geräte dar.

Vorteile:

- Sicherheit vor Manipulationen intelligenter Schadsoftware
- Platzsparende Integritätsprüfung
- Cloudbasierte Übertragung der Prüfergebnisse abgesichert

Ansprechpartner:

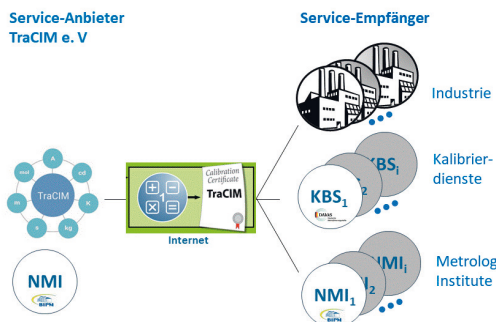
Dr. Bernhard Smandek
 Technologietransfer
 Telefon: +49 531 592-8303
 Telefax: +49 531 592-69-8303
 E-Mail: technologietransfer@ptb.de

Dr. Daniel Peters
 Arbeitsgruppe
 Eingebettete metrologische Systeme

www.technologietransfer.ptb.de

PTB-Nummer 0424

TraCIM



Messgeräte bestehen nicht nur aus Sensoren sondern führen vielfältig komplexe Berechnungen durch, bis das Messergebnis angezeigt wird. Diese metrologischen Algorithmen zur Auswertung und Verarbeitung von Messdaten lassen sich durch einen Web-Service des Netzwerks Traceability for Computationally-Intensive Metrology (TraCIM) validieren. Hierdurch können Fehler bei der Softwareimplementierung aufgedeckt bzw. vermieden werden, die mit der unaufhörlich steigenden Komplexität von Auswertesoftware entstehen. Die Validierung erfolgt dabei über das Internet.

Um die Vergleichbarkeit von Auswertergebnissen zu ermöglichen und Herstellern und Anwendern metrologischer Auswerteprogramme ein hohes Maß an Sicherheit zu gewähren, haben sich europäische Metrologieinstitute (NMIs) im Verein TraCIM e. V. zusammengefunden. Dieser Verein setzt Qualitätsstandards für die Validierung von Referenzdaten, die von seinen Mitgliedern für die Prüfung zur Verfügung gestellt werden. Jedes der teilnehmenden NMIs hat die Möglichkeit, Tests eigenverantwortlich anzubieten.

Vorteile:

- Validierung von Auswertelgorithmen von Messgeräten über einen Web-service
- hohe Verfügbarkeit
- schnelle Bearbeitung
- universelle Einsetzbarkeit

Bisher werden Referenzdaten für die Validierung von Algorithmen für den Bereich der Koordinatenmesstechnik angeboten wie:

- Durchführung von nationalen und internationalen Vergleichsmessungen
- Gauß-Algorithmen
- Tchebyscheff-Algorithmen prismatischer Körper

Geplant sind weitere Services, die derzeit in unterschiedlichen Forschungsprojekten für folgende Anwendungen entwickelt werden:

- 3D-Lochbildeinpassung
- Erweiterter Tchebyscheff-Algorithmus
- Verkürztes Fehlertrennverfahren für Teilungsmessungen
- Verzahnungsauswertung für evolventische Profile
- Freiformmessung

Ansprechpartner:

Andreas Barthel
 Technologietransfer
 Telefon: +49 531 592-8307
 Telefax: +49 531 592-69-8307
 E-Mail: technologietransfer@ptb.de

Frank Härtig
 Projektkoordinator

www.technologietransfer.ptb.de

PTB-Nummer 7036

Wirtschaftliche Bedeutung

Das TraCIM-Projekt stellt einen neuen Ansatz zur Validierung von Berechnungsalgorithmen für Messgeräte dar. Es beschränkt sich dabei nicht auf ein einzelnes Messgerät, sondern fungiert als Basisservice für vielfältige Anwendungen.

Durch den Service können schnellere und somit auch kostengünstiger Validierungen und Zertifizierungen einem wesentlich weiteren Zielkundenkreis angeboten werden.

Entwicklungsstand

Das System wurde ausführlich für einzelne Servicebereiche getestet und wird unter <https://tracim.ptb.de/> den Anwendern und Herstellern zur Verfügung gestellt.

Impressum

Die PTB-Mitteilungen sind metrologisches Fachjournal der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. Als Fachjournal veröffentlichen die PTB-Mitteilungen wissenschaftliche Fachaufsätze zu metrologischen Themen aus den Arbeitsgebieten der PTB. Die PTB-Mitteilungen stehen in einer langen Tradition, die bis zu den Anfängen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (gegründet 1887) zurückreicht.

Verlag

Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7
28195 Bremen
Internet: www.schuenemann.de
E-Mail: info@schuenemann-verlag.de

Herausgeber

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)
ISNI: 0000 0001 2186 1887
Postanschrift:
Postfach 33 45,
38023 Braunschweig
Lieferanschrift:
Bundesallee 100,
38116 Braunschweig

Redaktion/Layout

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, PTB
Sabine Siems
Dr. Dr. Jens Simon (verantwortlich)
Dr. Sascha Eichstädt
(wissenschaftlicher Redakteur)
Telefon: (05 31) 592-82 02
Telefax: (05 31) 592-30 08
E-Mail: sabine.siems@ptb.de

Leser- und Abonnement-Service

Karin Drewes
Telefon (0421) 369 03-56
Telefax (0421) 369 03-63
E-Mail: drewes@schuenemann-verlag.de

Anzeigenservice

Karin Drewes
Telefon (0421) 369 03-56
Telefax (0421) 369 03-63
E-Mail: drewes@schuenemann-verlag.de

Erscheinungsweise und Bezugspreise

Die PTB-Mitteilungen erscheinen viermal jährlich. Das Jahresabonnement kostet 39,00 Euro, das Einzelheft 12,00 Euro, jeweils zzgl. Versandkosten. Bezug über den Buchhandel oder den Verlag. Abbestellungen müssen spätestens drei Monate vor Ende eines Kalenderjahres schriftlich beim Verlag erfolgen.

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.

Printed in Germany ISSN 0030-834X

Die fachlichen Aufsätze aus dieser Ausgabe der PTB-Mitteilungen sind auch online verfügbar unter:
doi: 10.7795/310.20170499



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt, das nationale Metrologieinstitut, ist eine wissenschaftlich-technische Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.

