

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
	<i>Gesetzliches Messwesen</i>	24
	<i>Qualitätsinfrastruktur</i>	26
	<i>Metrologie in der Analyse großer Datenmengen</i>	29
	<i>Metrologie der Kommunikationssysteme für die Digitalisierung</i>	31
	<i>Metrologie für Simulationen und virtuelle Messgeräte</i>	33
	<i>Technologische Infrastruktur</i>	34
▪	Literaturverzeichnis	37

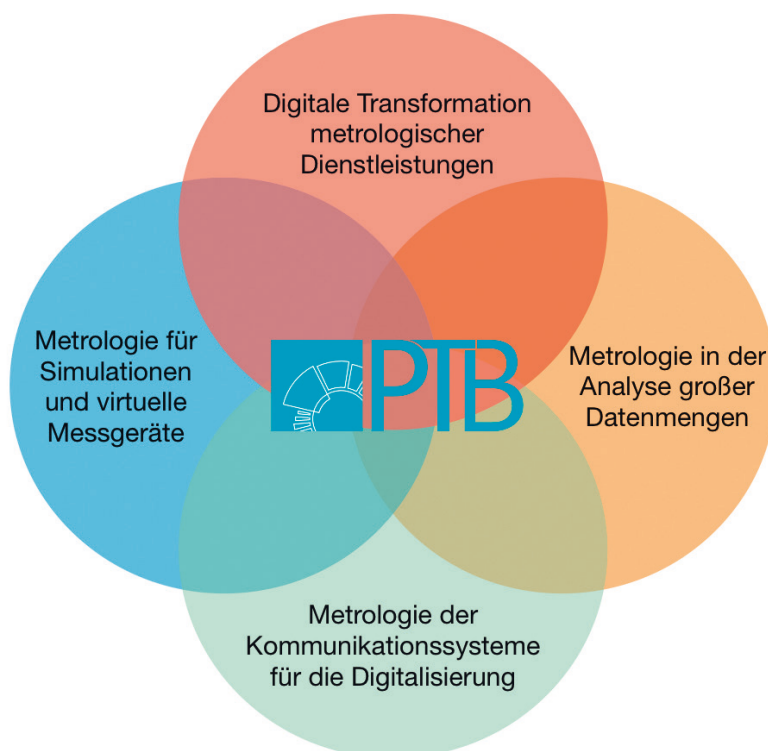
PTB-Digitalisierungsstrategie

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.

Digitale Kalibrierscheine – 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.

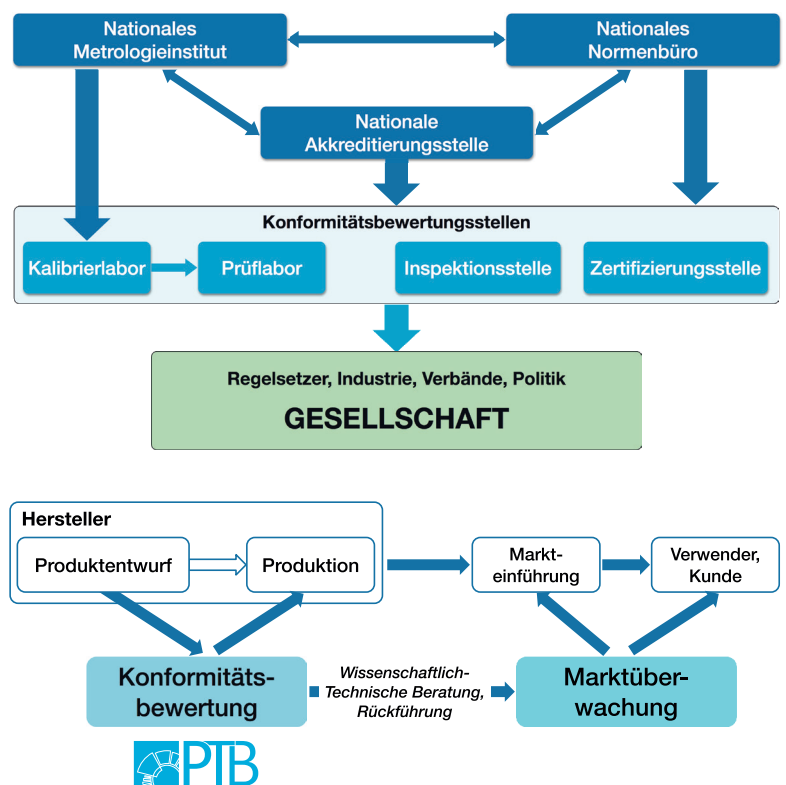


Abbildung 1: Die Rolle der PTB in der deutschen Qualitätsinfrastruktur (oben) und die Rolle der PTB im gesetzlichen Messwesen und der Marktüberwachung (unten)

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-

kette 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 Lizensierungen 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

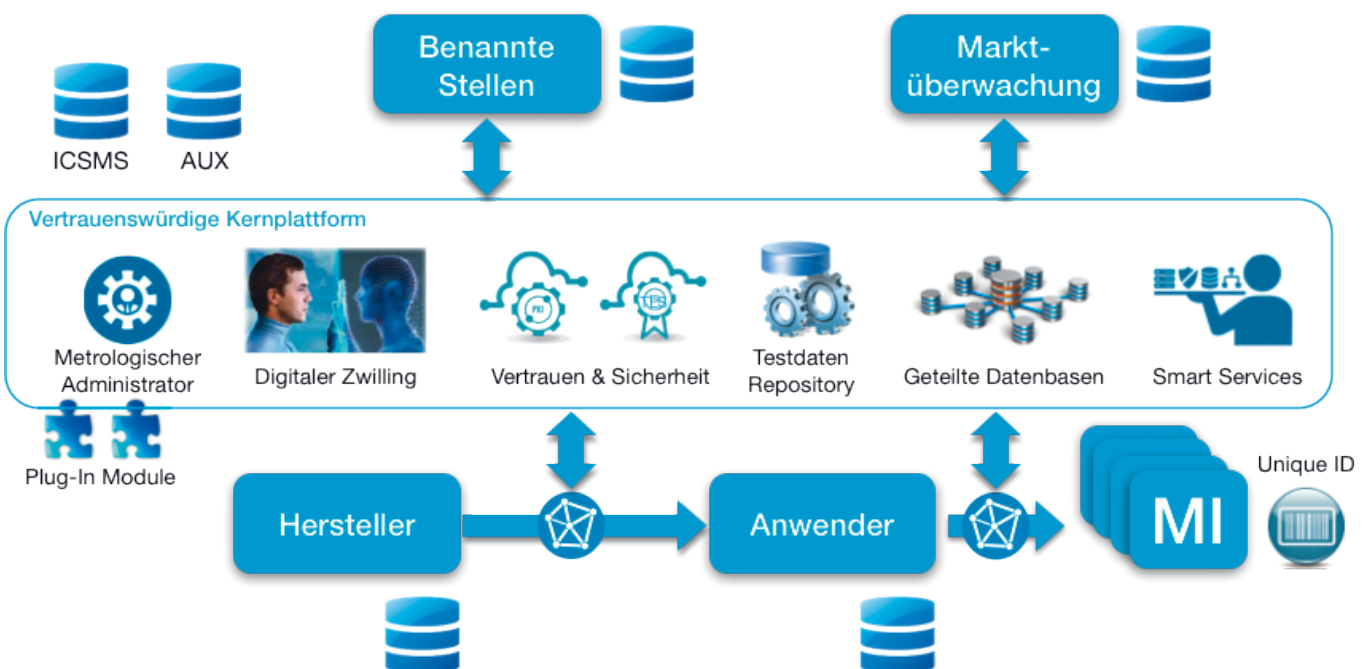
und die Software des Gerätes aktualisieren, um bspw. die Kalibrierparameter anzupassen. Diese Vorgehensweise ist inzwischen Stand der Technik, aber mit dem deutschen Eichrecht und den Strahlenschutzrichtlinien nicht vereinbar.

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

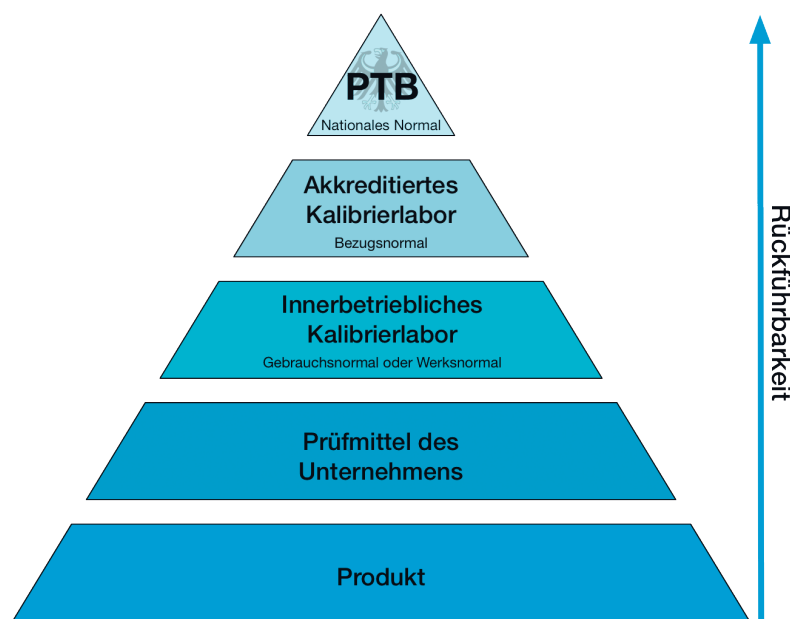


legt nahe, dass im Rahmen der „Digitalen Agenda“ auch weitere Aufgabenfelder der PTB mit gesetzlicher Beauftragung von der Notwendigkeit der Bewertung von IT-Sicherheitsrisiken betroffen sein werden. Daher wird hierfür die Gründung einer Arbeitsgruppe „Metrologische Sicherheitsgutachten und Risikoanalysen“ 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

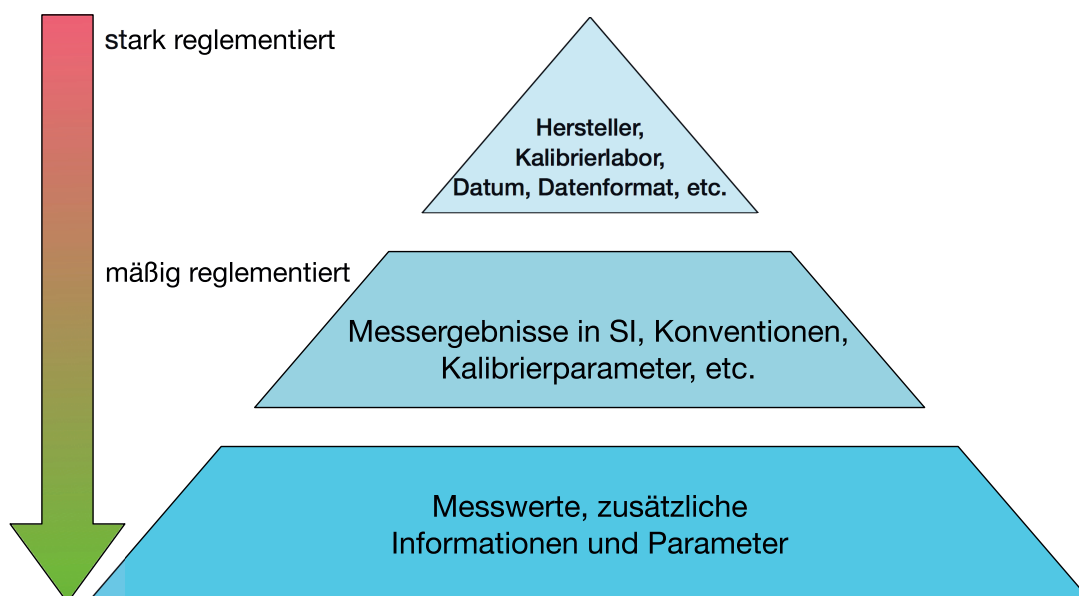


Kalibrierhierarchie in der Bundesrepublik Deutschland

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 „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-schlusselftechnologie/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].