



**Metrología para la digitalización
de la economía y la sociedad**

Contenido

Metrología para la digitalización de la economía y la sociedad

▪ Resumen ejecutivo	5
▪ Introducción	7
▪ Desafíos para el PTB como piedra angular de la infraestructura de la calidad y de la metrología legal	11
▪ Áreas temáticas de la digitalización: nuevas tareas del PTB.....	15
<i>Metrología legal</i>	16
<i>Infraestructura de la calidad</i>	18
<i>Metrología en el análisis de grandes volúmenes de datos</i>	22
<i>Metrología de los sistemas de comunicación para la digitalización</i>	24
<i>Infraestructura tecnológica</i>	26
▪ Bibliografía	29

Metrología para la digitalización de la economía y la sociedad

“En el marco de la digitalización económica (uso virtual de los recursos, Industria 4.0, Internet de los objetos, etc.), el PTB deberá asumir un papel protagonista en la metrología en lo que concierne las magnitudes de medida del internet y de la digitalización, particularmente en las áreas de la tecnología de medición, de la normalización y calibración y de los parámetros de referencia de las tecnologías de la información.”

Informe del Consejo Científico, 2017



“Queremos ampliar la infraestructura de la calidad (normalización, acreditación y evaluación de la conformidad, metrología, seguridad técnica de los productos y vigilancia del mercado), ya que forma parte integrante del auge tecnológico en Alemania y es la esencia de la marca “Made in Germany”. Para ello, el Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) y el Instituto Federal de Investigación y Ensayos de Materiales (BAM) siguen siendo reforzados para poder defenderse frente a la competencia global en su oferta de servicios científicos-técnicos.”

Piedras angulares de la política de innovación, BMWi (Ministerio Federal de Economía y Energía), 2017

Resumen ejecutivo

La innovación y la confianza en una infraestructura de la calidad eficiente son el núcleo de una economía y una sociedad estable y exitosa. La piedra angular de una infraestructura de la calidad eficiente es la capacidad de obtener datos válidos a través de mediciones de alta precisión: la metrología. La economía y la sociedad del siglo 21 están en un profundo proceso de expansión digital y de transformación: ahora se pone el fundamento para consolidar el núcleo del éxito en el espacio digital – base para el desarrollo de la economía y de la sociedad en la era digital. Desde hace muchos años, la digitalización es un proceso continuo en el cual se abren – a gran velocidad – posibilidades completamente nuevas para la conexión de objetos y la utilización de datos e informaciones almacenados. En particular, esto se debe a la evolución dramática de las capacidades informáticas y de almacenamiento, así como a la velocidad del intercambio de datos y a la disponibilidad a bajo coste de diversos sensores de aplicación flexible.

El papel de la metrología en la digitalización de la economía y sociedad

Los valores medidos, datos, algoritmos, procedimientos matemáticos y estadísticos, así como las arquitecturas de comunicación y seguridad constituyen la base de la expansión digital y de la transformación.

Por lo tanto, el fortalecimiento digital de la **Infraestructura de la Calidad (IC)** – la tríada de metrología, normalización y acreditación – así como de la **metrología legal** con la evaluación de la conformidad, la verificación y la vigilancia del mercado, son requisitos esenciales para el éxito de la transformación digital hacia una economía, industria y sociedad interconectada. En este contexto, el Physikalisch-Technische Bundesanstalt, como Instituto Nacional de Metrología, desempeña un papel clave con

múltiples responsabilidades y competencias. Éstas incluyen, entre otras cosas, no sólo el desarrollo y la validación de métodos de medición de alta precisión, algoritmos y métodos de análisis de datos, sino también la validación de datos de medición por trazabilidad al Sistema Internacional de Unidades (SI). Entre otras cosas, esto constituye la base de la acreditación, de la metrología legal dentro de la Ley de Medición y Verificación (MessEG, por sus siglas en alemán) y del Reglamento de Medición y Verificación (MessEV, por sus siglas en alemán), así como en el desarrollo conjunto de reglas y normas nacionales e internacionales y en el asesoramiento a las autoridades de verificación para la vigilancia del mercado. Por consiguiente, el PTB constituye una piedra angular de la infraestructura nacional de la calidad y de la metrología legal, y se ha propuesto el objetivo de actuar como un socio fiable para la industria y la sociedad en la transformación digital. La atención se centra particularmente en los servicios metrológicos ofrecidos por el PTB (servicios regulados por la ley) y los servicios ofrecidos por la IC, así como en la industria alemana de equipos de medición y sensores que se compone frecuentemente de empresas medianas.

A nivel internacional, la metrología para la digitalización se promueve intensivamente a través de programas de investigación y mediante el establecimiento de nuevos grupos de competencia. En el NIST en los EE.UU., por ejemplo, hay varios grupos grandes que, desde hace muchos años, elaboran – junto con instituciones gubernamentales y socios del sector privado – bases reguladoras y administrativas de renombre para las áreas de “Cloud Computing”, “Big Data”, seguridad informática y aprendizaje de las máquinas, así como las bases para el desarrollo de los canales de comunicación de alto rendimiento (5G). También el NPL en el Reino Unido está desarrollando masivamente el área de “Data Science”, redes 5G y de la investigación relacionada con la digitalización. Actualmente,

se observan actividades similares en todo el mundo. El PTB continuará desarrollando sus competencias de forma correspondiente para poder desempeñar su papel en la transformación y expansión digital como uno de los institutos de metrología líderes en el mundo.

Nuevos temas centrales identificados

En un estudio exhaustivo basado en un profundo análisis interno de las competencias básicas del PTB, en los requisitos de clientes ya expresados directamente, así como en los resultados de una visita de una delegación del PTB en el NIST y varios debates de expertos, se identificaron nuevas tareas básicas para apoyar la transformación digital y nuevas áreas de enfoque para el PTB:

A. **Transformación digital de servicios metrológicos**

Aquí, la atención se centra en la mejora digital de la infraestructura de la calidad y de la metrología legal, entre otras cosas a través del desarrollo de arquitecturas de referencia, métodos estadísticos validados para el “predictive maintenance” (mantenimiento predictivo), una infraestructura para certificados de calibración digitales y, no menos importante, a través del establecimiento de una “Metrology Cloud” (nube de metrología) como infraestructura de la calidad digital para armonizar y desarrollar la evaluación de la conformidad y la vigilancia del mercado.

B. **Metrología en el análisis de grandes volúmenes de datos**

El objetivo es el desarrollo de métodos de análisis metrológicos para grandes cantidades de datos y la evaluación de métodos de aprendizaje automático para “Big Data” (datos grandes), con el enfoque en aplicaciones metrológicas existentes y cada vez más relevantes para la industria en las que hay que procesar grandes cantidades de datos y derivar informaciones de alta dimensión como, por ejemplo, en la técnica de imagen y la fotónica.

C. **Metrología de los sistemas de comunicación para la digitalización**

Este tema se centra en la seguridad y validación metrológica de una comunicación fiable, segura y eficiente en escenarios complejos. Abarca la trazabilidad de magnitudes de medida de alta frecuencia para las redes 5G, las magnitudes de medida no lineales y estadísticas

en altas frecuencias, variables de medición derivadas en sistemas de comunicación digitales y sistemas de antena complejos.

D. **Metrología para simulaciones e instrumentos de medición virtuales**

Mediante el desarrollo de métodos analíticos y procedimientos de aprobación para sistemas de medición en red y sistemas de medición virtualizados, se apoyan activamente la simulación de sistemas de medición complejos (por ejemplo, tecnología de medición de forma óptica o metrología por coordenadas) para la planificación y el análisis de experimentos, los procedimientos y patrones para el control de producción automatizado y los procesos de medición virtuales.

Estrategia de implementación

Para el PTB, las grandes piedras angulares en el apoyo de la transformación digital de la economía y la sociedad son, por un lado, los proyectos transversales interdisciplinarios:

Metrology Cloud – Establecimiento de una plataforma central fiable para una infraestructura de la calidad digital mediante el acoplamiento de infraestructuras de datos y bases de datos existentes y un acceso diferenciado de todos los socios para la mejora digital de la metrología legal.

Certificado de calibración digital – Desarrollo de una estructura de información digital segura y estandarizada para el uso universal en la calibración, acreditación y medición, y una actualización digital de toda la jerarquía de calibración en la infraestructura de la calidad.

Experimentos virtuales y metrología basada en matemáticas – Desarrollo de un grupo de competencia interdisciplinario virtual para el apoyo metrológico del cambio de paradigma para el uso de simulaciones y el análisis de datos como componente esencial de los métodos de medición.

Además, los departamentos correspondientes deberán prestar un apoyo sostenible a la investigación metrológica concreta con vista a las redes modernas de alta frecuencia (5G), la ampliación de la infraestructura de la calidad a la vigilancia en línea, así como un apoyo metrológico a la fabricación de precisión digitalizada.

Introducción

Básicamente, el término “digitalización” se refiere a la transformación de cantidades analógicas en valores discretos para el almacenamiento y procesamiento electrónico [1]. En la actualidad, sin embargo, el término se utiliza de manera más general, como transformación de toda la sociedad hacia el uso de tecnologías digitales [2] y para la creciente interconexión de datos y máquinas en los procesos de negocio, utilizando interfaces digitales. La nueva calidad del proceso de digitalización se expresa en la integración en la red, de las interconexiones locales hasta las redes globales. Los datos se intercambian entre las máquinas y los seres humanos de forma flexible y automatizada, se evalúan y son visualizados. Esto abre nuevas posibilidades de comunicación, nuevos campos de negocio para las empresas existentes y ha creado sectores de industria e investigación completamente nuevos. Así que según un estudio de BITKOM [3], el 65% de las empresas alemanas opinan que la digitalización cambiará sus modelos de negocio existentes.

“Quizás las interrupciones más significativas en los negocios provendrán de una combinación de sensores conectados, dispositivos y objetos (Internet de Cosas), junto con nuevas formas de analizar, actuar y monetizar los flujos de datos resultantes.”

(Estudio atos “Journey 2020”)

Por otro lado, habrá muchos nuevos retos, dado que los conceptos, normas y prácticas existentes muchas veces no se pueden transferir al mundo digital y los sistemas en red [4]. Así pues, en el campo de la **tecnología de medición**, a los fabricantes de sensores se les exige cada vez más ofrecer no solo los instrumentos puros de medición, sino también capacidades de medición. Como consecuencia, se desarrollan cada vez más sensores con inteligencia adicional y pre-procesamiento de datos integrado [5]. Esto implica grandes desafíos para las calibraciones trazables; ya no basta el enfoque puro de la medición exacta.

La cantidad de datos que, debido a la digitalización, debe ser procesada está aumentando rápidamente y solamente puede ser utilizada de forma rentable con la ayuda de herramientas matemáticas y estadísticas adecuadas [6] [7] [8]. Como primer paso, las empresas a menudo optan por el camino de visualizar adecuadamente el flujo de datos. Para este propósito y sobre la base de los datos de los sensores, se están visualizando – en un “gemelo digital” de la planta – los procesos que actualmente tienen lugar. Los métodos del **“predictive maintenance”** [9] van más lejos; a través del análisis estadístico de datos se sacan conclusiones en cuanto a la fiabilidad previsible del sistema. De este modo, se pueden evitar intervalos de inspección rígidos y, con ello, paradas innecesarias de la planta. A través de estos y otros métodos de análisis de datos en tiempo real inteligente y automatizado se puede lograr un aumento significativo de la eficiencia, también en plantas ya completamente automatizadas [10]. Por regla general, se utilizan métodos libres de modelo para el análisis de datos que son “entrenados” para grandes conjuntos de datos [11], lo que resulta en nuevos requisitos para la determinación cuantitativa de la calidad de los resultados. Al mismo tiempo, también los métodos basados en modelos requieren cada vez más nuevos enfoques para facilitar la implementación de los conceptos establecidos del **análisis de datos** para las cantidades de datos cada vez mayor, procedentes, por ejemplo, de los métodos de imagen. En la metrología, este reto se muestra cada vez más en la necesidad de determinar y diseminar incertidumbres de medida para magnitudes de alta dimensión. Debido a la integración de diferentes fuentes de datos en una red y sistemas de medición distribuidos, estas exigencias al análisis de datos en la metrología seguirán aumentando.

„El término de la calidad de los datos se refiere a la calidad y fiabilidad misma de los objetos de datos. Siempre que sea posible, la incertidumbre en un dato debería ser cuantificada adecuadamente.”

(Consejo para la Infraestructura de la Información, 2016)

Además, como con todas las aplicaciones digitalizadas, los **objetivos de protección de la TI (Tecnología de la Información) – integridad, confidencialidad y disponibilidad** en sus diversas formas – juegan un papel fundamental [12] [13]. Los requisitos de protección varían en función de las necesidades específicas de la aplicación. La integridad de los equipos de medición, es decir, la protección contra el acceso no autorizado a los equipos de medición y su calibración, también juega un papel importante [14]. Especialmente en el sector regulado legalmente – la metrología legal – los objetivos de protección de la TI son de importancia fundamental [4]. Allí, el aseguramiento de la integridad, confidencialidad y disponibilidad es el requisito imprescindible para la aceptación de nuevas tecnologías de la información y telecomunicación (TIC). De no ser así, la demanda de los más altos estándares del BSI (Oficina Federal para la Seguridad de la Información; BSI por sus siglas en alemán) representaría una exigencia innecesariamente alta y, por lo tanto, constituiría un obstáculo para la innovación y el desarrollo. Aquí, el PTB puede y debe desempeñar un papel clave en el desarrollo de soluciones adecuadas y conformes a la ley para los fabricantes, usuarios y la vigilancia del mercado.

Tal como las soluciones técnicas del área no regulada, que se utilizarán cada vez más en la metrología legal (por ejemplo, “cloud computing” (computación en nube) o mantenimiento remoto), muchas de las soluciones necesarias para el área regulada también serán utilizables en el área no regulada, ya que aquí se esperarán necesidades similares debido a los requisitos de los usuarios. Al mismo tiempo, dispositivos con niveles de seguridad innecesariamente altos harán la penetración en el mercado casi imposible. Se puede dibujar una imagen correspondiente para la metrología legal, donde los fabricantes quieren utilizar cada vez más las tecnologías de la información y comunicación (TIC) modernas. La **evaluación de la conformidad** necesaria prevé reglas estrictas para la comunicación y el procesamiento de datos, mientras que al mismo tiempo se debe garantizar una verificabilidad fácil para la vigilancia del mercado [15]. En el futuro, hay que afrontar este acto de equilibrio para fortalecer la metrología legal digitalmente

“El BMWi espera de la Industria 4.0 valores agregados de más de 30 mil millones de euros al año. El 80% de las empresas industriales dicen que van a digitalizar su completa cadena de valor hasta el año 2020, lo que requiere inversiones de 40 mil millones de euros al año, según el estudio ‘Industria 4.0’ de PWC.”

(BMW & BMAS “Trabajar en el mundo digital”)
(Ministerio Federal de Economía & Energía & Ministerio Federal de Trabajo y Asuntos Sociales)

Actualmente, la industria es la fuerza motriz más grande para la transformación digital, lo cual se refleja en conceptos como “Industria 4.0”, “Industrial Internet of Things” (Internet Industrial de las Cosas) o “Cyber Physical Systems” (sistemas cyber-físicos). Según un estudio recientemente realizado por la Asociación Alemana de Construcción de Máquinas e Instalaciones (VDMA, por sus siglas en alemán) [16], una cuarta parte de las empresas en el sector de la construcción de máquinas e instalaciones ya ofrecen nuevas tecnologías digitales como, por ejemplo, servicios en la nube. Estas empresas ven el mayor beneficio en la expansión de la automatización, aumentando así la competitividad de la industria alemana. Las competencias necesarias para dicho objetivo ya no se concentran en la metrología pura, sino más bien en el desarrollo de software y el análisis de datos complejos. El mando y control de las instalaciones se realiza cada vez más mediante las llamadas “Apps”; estas aplicaciones deben ser capaces de incluir también fuentes de datos ajenos, es decir, fuentes que no proceden del fabricante. Esto requiere una implementación e interconexión intersectorial que solo puede ser construida sobre la base de unas normas adecuadas y aceptadas. Como tendencia general, se puede observar que las empresas más bien optan por una cooperación con otros socios industriales para la elaboración de acuerdos bilaterales, en vez de optar por los caminos clásicos de la normalización y estandarización. Como razón, se aduce la presión del mercado internacional que exige acciones rápidas. Así, por ejemplo, el estudio del VDMA recomienda que las empresas no esperen el desarrollo de normas generales, sino que las empresas mismas deban ofrecer las primeras soluciones [16]. Este desarrollo debe ser contrarrestado por proyectos de normalización rápidos, concentrados, manejables y flexibles.

Junto con la ingeniería mecánica y la tecnología de la información, la fotónica constituye una importante tecnología clave para Alemania como sitio de innovación. En 2011, ya contribuyó a los resultados económicos de la UE con 66 mil millones de euros en las ventas de la producción. [17]. El cambio inminente hacia (micro)sistemas fotónicos integrados así como la vinculación con herramientas rápidas y potentes de procesamiento de imagen electrónico hacen que la fotónica sea la técnica estratégica en productos y procesos en un número creciente de mercados, del control (por ejemplo, control por movimientos, micropantallas) a través de la captación de datos (sistema de sensores) y el procesamiento de datos (imagen computacional) hasta la producción (impresión 3D / fabricación aditiva, medición de la calidad en línea, procesamiento láser) [18]. Así

pues, la fotónica es al mismo tiempo promotor y usuario de la digitalización. Señaladamente, los experimentos y simulaciones virtuales son una herramienta básica en la fotónica para la planificación, optimización y el análisis. Sin embargo, a menudo hay una falta de normas fiables y de trazabilidad metrológica [17], [18]. Basándose en sus amplias competencias y con una expansión selectiva de las actividades de investigación, el PTB puede desempeñar un papel clave en el futuro.

Los trastornos de la transformación digital también influyen de forma masiva el sector de la salud. En la biotecnología, por ejemplo, habrá conceptos innovadores de digitalización que ayudarán a producir materiales y sustancias activas a través de nuevos procedimientos de proceso, producción y cooperación. Para su realización, cooperaciones intersectoriales e interdisciplinarias con socios tanto en el sector industrial como en el campo de la investigación son necesarias. Las redes transversales en la bioeconomía, con objetivos comunes y una infraestructura informática en común, pueden servir como ejemplos de este tipo de cooperación. El objetivo consiste en desarrollar plataformas innovadoras para la investigación, el desarrollo y la implementación de productos y procesos de base biológica, todo esto energéticamente eficiente y aprovechando los recursos con eficacia. A este respecto, el PTB ya está en estrecho contacto con grandes compañías farmacéuticas alemanas.

Desafíos para el PTB como piedra angular de la infraestructura de la calidad y de la metrología legal

El desafío para el PTB en la digitalización de la economía y la sociedad se deriva de su función específica, regulada por la ley en la **infraestructura de la calidad** (con la tríada de metrología, normalización y acreditación) y la **metrología legal** (con la evaluación de la conformidad y la vigilancia del mercado). El PTB puede y debe actuar como socio fuerte y mediador entre la industria y la normalización, basándose en las competencias correspondientes necesarias en las áreas establecidas de la metrología, así como en las nuevas áreas del entorno de la TI, de las comunicaciones y del análisis de datos para apoyar, promover y establecer lo más rápidamente posible la infraestructura de la calidad y la metrología legal como patrocinador de la innovación y garante de la sostenibilidad de la calidad alemana. Por ende, el informe del Consejo Científico recomienda que el PTB

“[debería] tomar un papel destacado en la metrología para las magnitudes de medida del internet y de la digitalización, sobre todo en los campos de la metrología, normalización y calibración y de las magnitudes de referencia en la tecnología de la información.”
 (Consejo Científico, 2017)

Para las empresas, la **infraestructura de la calidad** alemana es un argumento de venta efectivo, frecuentemente aceptado en todo el mundo; como modelo para una cadena de trazabilidad sostenible, goza de gran prestigio a nivel internacional. La estandarización y la normalización, que en el sector técnico y, parcialmente, en el sector médico están basadas en la metrología, sientan las bases para el acceso al mercado frecuentemente internacional de las empresas medianas y para la interoperabilidad de los modelos de negocio. La trazabilidad (metrología), la normalización y la acreditación forman la columna vertebral de la infraestructura de la calidad y, por lo tanto, una tarea principal

del PTB. La estrecha colaboración con los laboratorios DAkkS (Organismo Alemán de Acreditación, por sus siglas en alemán), para los cuales el PTB proporciona los evaluadores y realiza aproximadamente 3.500 calibraciones al año, la cooperación en más de 400 organismos de normalización, la función del Presidente del PTB como vicepresidente del DIN, el papel del PTB para los organismos de evaluación de la conformidad, presidiendo la comisión investigadora de reglas así como la comisión de los organismos de evaluación de la conformidad, la presidencia del PTB en el Servicio Alemán de Calibración (DKD) así como en la Asamblea General del sistema de medición y verificación

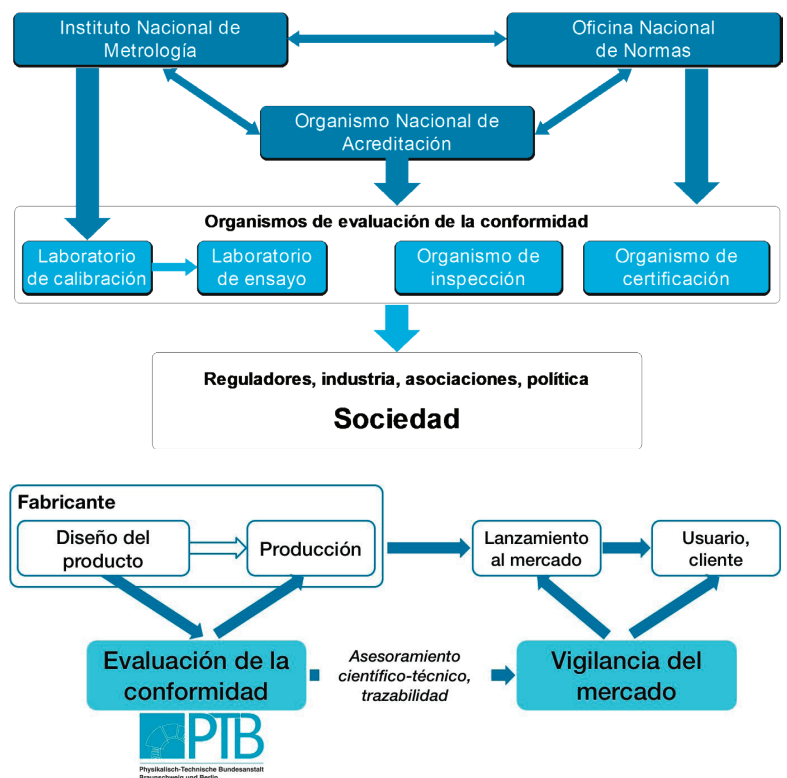


Figura 1: El papel del PTB en la infraestructura de la calidad alemana (arriba) y el papel del PTB en la metrología legal y la vigilancia del mercado (abajo)

para el intercambio de información y experiencia y la cooperación con muchos otros socios – todo esto contribuye a que el PTB asegure la posición de la economía alemana, proporcionando capacidades de medición fiables y de alta precisión.

Actualmente y de manera dramática, la transformación digital de los productos y el uso de procesos digitales en la **evaluación de la conformidad** crean nuevos desafíos, por ejemplo, para el proceso de la calibración, y exigen una transformación digital de toda la cadena de trazabilidad. El uso de sensores inteligentes como producto en la infraestructura de la calidad requiere, por ejemplo, una trazabilidad adecuada que tiene en cuenta las características físicas del transductor, así como el pre-procesamiento digital integrado de los datos de medición. Al mismo tiempo, una transformación digital de los procesos administrativos en la cadena de trazabilidad, acreditación y evaluación de la conformidad requiere una normalización adecuada, así como una instancia central y fiable para la certificación de los certificados de calibración digitales.

“Las magnitudes de referencia son cada vez más importantes para la economía digitalizada y, en vista del desarrollo dinámico de servicios basados en la nube, la demanda de calibraciones de sistemas digitales es cada vez más urgente. [...] En este contexto, las actividades para la elaboración de la metrología para la digitalización se apoyan fuertemente.”

(Consejo Científico, 2017)

La **metrología legal**, con la evaluación de la conformidad antes de la introducción al mercado y el sistema de verificación y la vigilancia del mercado en la aplicación, garantiza la confianza mutua entre los clientes y los fabricantes. Particularmente en el área de los medidores del consumo energético (electricidad, agua, gas, combustible, etc.) y de las balanzas utilizadas en el comercio se muestra – con más de 170 millones de medidores y un volumen de ventas anual de aproximadamente 150 mil millones de euros solo en Alemania – la importancia económica y social de la metrología legal [19]. La “Directiva sobre Instrumentos de Medida” (MID) 2014/32 / UE, que ha sido implementado a nivel nacional con la Ley de Medición y Verificación [20] y el Reglamento de Medición y Verificación [20], forma la base jurídica a nivel europeo. Por un lado, el ámbito de la evaluación de la conformidad (y normalización) se beneficia a nivel europeo de las redes establecidas en diversos gremios y asociaciones. Por otro lado, el **“New Approach” (es decir, el Nuevo Enfoque)** de la UE ha puesto los cimientos para el reconocimiento de los certificados de conformidad en toda la UE y la

restricción a los requisitos básicos en el campo de la evaluación de la conformidad [22]. Esto también implica una apertura básica frente a nuevas tecnologías, así como el fortalecimiento de la normalización europea y del mercado interior europeo. En el sector reglamentado por la ley, sin embargo, la creciente complejidad de las tecnologías de información y comunicación en los instrumentos de medición supone un creciente esfuerzo para la evaluación de la conformidad y unas exigencias enormes para el sistema de medición y verificación y la vigilancia del mercado. Por consiguiente, existe un riesgo creciente de que puedan ser consideradas un freno a la innovación por los fabricantes. Aquí se necesitan arquitecturas de referencia adecuadas para una aceleración de la evaluación de la conformidad y el apoyo al sistema de verificación y la vigilancia del mercado. Además, es indispensable establecer ofertas digitales, basadas en la nube, con una instancia central como núcleo de confianza para la transformación digital de los procesos en la metrología legal.

“El PTB es fuertemente apoyado en sus esfuerzos de iniciar el desarrollo de una arquitectura de referencia para la computación en nube segura y en su función de coordinador central. [...] La metrología en nube debería [...] servir para poner en práctica los conceptos digitales para la coordinación, la concentración, la simplificación, la armonización y el aseguramiento de la calidad de servicios metrológicos en Europa para todas las partes implicadas.”

(Consejo Científico, 2017)

Desde el punto de vista de las empresas, la rápida progresión de la transformación digital plantea un gran número de nuevas exigencias y representa el mayor desafío para la preservación de su propia competitividad. Los ejemplos de una transformación exitosa mencionados en la “Plataforma Industria 4.0” [23] revelan que los requisitos para las empresas en la implementación de una transformación digital se encuentran principalmente en las siguientes áreas:

- competencias en los sectores TI y software;
- modelización y proceso de medición virtual o “gemelo digital”;
- almacenamiento de datos en tiempo real y servicios en la nube;
- sistemas autónomos;
- desarrollo e integración de aplicaciones;
- vinculación del mundo virtual y física (SISTEMA CYBER-FÍSICO, CPS en inglés).

Estas tecnologías ya han superado la llamada fase del “alboroto mediático” y forman una parte integral de la actividad industrial cotidiana [16]. Las tecnologías necesarias para los desarrollos disruptivos previsibles [24] ya están parcialmente disponibles en gran variedad y, según el estudio [24], conducirán a cambios adicionales en el mundo de los negocios y la sociedad en los próximos 2 a 3 años. Las empresas se adaptan en gran medida y con una velocidad considerable, lo cual se puede ver en la Fig. 2 para el sector de la construcción de máquinas e instalaciones, según

el estudio IMPULS de la VDMA [16]. En cambio, el estado actual de la transformación digital en el PTB y, por lo tanto, también de gran parte de la IC y de las autoridades de verificación de los estados federados está mucho menos desarrollado. Si no se corrige esta deficiencia de forma efectiva y rápida, existe el riesgo de que la infraestructura de la calidad en su totalidad se vea como un obstáculo a la innovación y, por consiguiente, perderá su importancia.

Áreas temáticas de la digitalización: nuevas tareas del PTB

El intercambio continuo entre la política, la economía y la investigación es un requisito previo para el éxito de la transformación digital, ya que los retos de la digitalización sólo pueden ser enfrentados mediante esfuerzos conjuntos. La **“Plataforma Industria 4.0”** constituye el núcleo de las iniciativas nacionales, reuniendo a todos los socios y conectándolos por medio de redes [25]. Las diversas áreas temáticas son tratadas en grupos de trabajo y la conexión en red está coordinada por la dirección central. En este entorno, es sobre todo el campo de la estandarización y normalización que es de importancia para el PTB, ya que el PTB desempeña un papel central, tanto a nivel nacional como internacional, debido a su participación en más de 400 gremios, tal como lo señaló el Consejo Científico en su informe. En la discusión de expertos del PTB con representantes de la plataforma, este papel se confirmó claramente y la inclusión del PTB en la plataforma fue aprobada. El PTB ya forma parte del grupo de espejo de normalización y aportará su amplia experiencia y contactos en este campo. A través de actividades específicas de investigación con respecto a los nuevos retos de la digitalización y una transformación digital propia, el PTB podrá continuar a desempeñar de manera efectiva su papel de líder en este proceso.

El Gobierno Federal y los Ministerios Federales apoyan la transformación digital con una serie de medidas y medidas de fomento. De esta manera, por ejemplo, las deficiencias de información que fueron identificadas en las empresas medianas se abordan deliberadamente mediante la continua expansión de centros de competencia **“Mittelstand 4.0”** (PYME 4.0) y diversos programas de apoyo [26]. Un apoyo indirecto de estos proyectos por parte del PTB se puede realizar, por ejemplo, mediante la transformación digital del sistema de calibración o la facilitación de arquitecturas de referencia, acompañando los procesos de negocio digitales con interfaces digitales correspondientes en la cadena de medición y la IC a un nivel de seguridad adecuado.

Particularmente para las PYME, los centros de ensayos ofrecen la posibilidad de evaluar nuevas tecnologías sin riesgo propio y de encontrar soluciones en cooperación con socios competentes. Por lo tanto, el Ministerio Federal de Educación e Investigación (BMBF, por sus siglas en alemán) fomenta intensivamente este sector, y la asociación **Labs Networks Industrie 4.0** (LNI4.0) g) presta ayuda específica [27] [28]. El PTB ya se destaca por una multitud de proyectos de cooperación con las PYME en los que la tecnología y los conocimientos se transfieren mediante proyectos comunes y concesiones de licencias. Con el desarrollo específico de ofertas tecnológicas para los desafíos de la transformación digital, el PTB puede seguir asegurando su posición como promotor de la industria y la economía alemana. Para beneficiarse de los efectos de sinergia y aumentar la visibilidad de sus propias ofertas, se procura establecer una estrecha cooperación con la asociación LNI4.0. Ya se han llevado a cabo conversaciones iniciales con LNI4.0. La retroalimentación de la LNI4.0 a la normalización a través del **“Standardization Council 4.0”** (SC4.0) [29] y el reflejo en la multitud de organismos internacionales en los que el PTB ya está representado son de gran importancia para el PTB en esta cooperación porque permite, a través de las tecnologías desarrolladas, el apoyo sostenible de la entera infraestructura de la calidad. En este aspecto, el desarrollo de centros de ensayo adecuados en el PTB representa, en un doble sentido, un beneficio y una ventaja para la economía alemana. En un primer paso, el PTB tiene previsto crear – junto con socios interesados y la empresa Siemens – **un campo de prueba que se llama “Transformación Digital en la Infraestructura de la Calidad”**. Además, se identifican trabajos existentes a nivel interno del PTB que, en el futuro, pueden ser ofrecidos junto con la LNI4.0 como centros de ensayo para apoyar específicamente la transformación digital de la economía alemana. De ahí se desprende la idea de

otro campo de prueba del PTB en el ámbito de los instrumentos de medición virtuales, basándose en la determinación de la incertidumbre de medida de tareas de medición específicas para sistemas de medición 3D complejos.

En el área de la biotecnología, el BMBF apoya, a través de la medida de fomento “Espacios de Innovación Bioeconomía” dentro del marco de la “Estrategia Nacional de Investigación BioEconomía 2030”, la creación de proyectos en red con contenidos que van de la formación y capacitación a la normalización. También a iniciativa de la industria, el PTB participará en una solicitud de proyecto “La digitalización de la biotecnología” en las áreas de la trazabilidad de valores medidos, la transferencia segura de datos y la normalización.

A nivel europeo, también hay un número creciente de proyectos de cooperación e iniciativas de apoyo. La cooperación de varios socios europeos se orienta en la estrategia de la UE de un “**Digital Single Market**” [30], es decir de un mercado único digital, en la cual está anclado establecer un comercio digital sin fronteras, desarrollar reglas y normas que tienen en cuenta el progreso tecnológico y tomar medidas que permiten a la economía e industria europea de aprovechar por completo las posibilidades de la digitalización. Aparte del apoyo específico de proyectos de investigación, por ejemplo, en el marco de “Horizon 2020” [31] [32], esto implica también el desarrollo de una estrategia para una “European Open Science Cloud” dentro de la “European Cloud Initiative” [33], es decir para una “nube de ciencia abierta europea” dentro de la “Iniciativa Europea de Nube”. Mientras que la plataforma GovData [34] y las iniciativas legislativas actuales a nivel federal se limitan actualmente a datos administrativos, la “European Open Science Cloud” tiene por objeto explícito hacer libremente disponibles los resultados de investigación [33]. Como primer paso, se deben divulgar los datos de investigación obtenidos para los nuevos proyectos de investigación del programa “Horizon 2020”. Dado que el PTB participa en un gran número de proyectos europeos en el marco del programa “Horizon 2020”, este desarrollo también plantea grandes desafíos para la gestión de datos de investigación del PTB. Estos desafíos deben abordarse con prontitud. Esta necesidad también fue reconocida por el Consejo Científico que recomienda tomar acciones urgentes. El PTB ya ha adoptado las primeras medidas al respecto.

Metrología legal

En el ámbito de la metrología legal (evaluación de la conformidad, sistema de medición y

verificación, supervisión del mercado), la digitalización se manifiesta actualmente sobre todo en la creciente difusión de los denominados “sistemas inteligentes de medición” (p. ej. Smart Meter, es decir los contadores inteligentes), por ejemplo en el contexto de la “**digitalización de la transición energética**” los sistemas de medición distribuidos y las infraestructuras en nube [35] [36]. En general, se necesitan esfuerzos significativos para impulsar una transformación digital de la metrología legal (y de la infraestructura de la calidad), ya que, en muchas áreas, la digitalización de la industria depende de esto. Las divisiones del PTB con departamentos que, en el campo de la metrología legal, están a cargo de la verificación de propiedades físicas, registran un número creciente de solicitudes de la industria referente a sensores inteligentes digitales, sistemas de medición distribuida e infraestructuras en nube. En la actualidad, sin embargo, la integración de las tecnologías modernas de información y comunicación en los dispositivos de medición para áreas reguladas se ve obstaculizada por grandes impedimentos en el proceso de la aprobación y la evaluación de la conformidad. Respecto a la regulación y la práctica de la concesión de autorizaciones, los fabricantes lo consideran cada vez más un obstáculo a la innovación y temen desventajas competitivas a largo plazo. El PTB puede apoyar este proceso mediante el **desarrollo de arquitecturas de referencia lícitas**, que ofrecen soluciones aceptables con una seguridad adecuada y métodos de verificación sencillos para las tecnologías básicas de los nuevos campos tecnológicos. Los fabricantes que utilizan las arquitecturas de referencia ofrecidas por el PTB para sus instrumentos de medición pueden contar con un proceso rápido de aprobación y, por lo tanto, son capaces de comercializar las innovaciones con mayor rapidez. Al mismo tiempo, las arquitecturas de referencia garantizan el cumplimiento de las normas de seguridad necesarias y la verificabilidad necesaria para la supervisión del mercado. En particular, el desarrollo de arquitecturas para la separación lícita del software de los instrumentos de medición – en una parte legalmente relevante y una parte libre – permite a los fabricantes desarrollar en la parte libre del software nuevas ofertas innovadoras, actualizaciones periódicas del software y adaptaciones individuales al cliente, sin tener que pasar nuevamente por el proceso de aprobación.

Hay una clara tendencia hacia dispositivos de medición con componentes distribuidos y parcialmente virtualizados y la utilización de **servicios en nube**. En gran medida, esto también es válido en la metrología legal. La mera separación en unidades – registro, procesamiento y

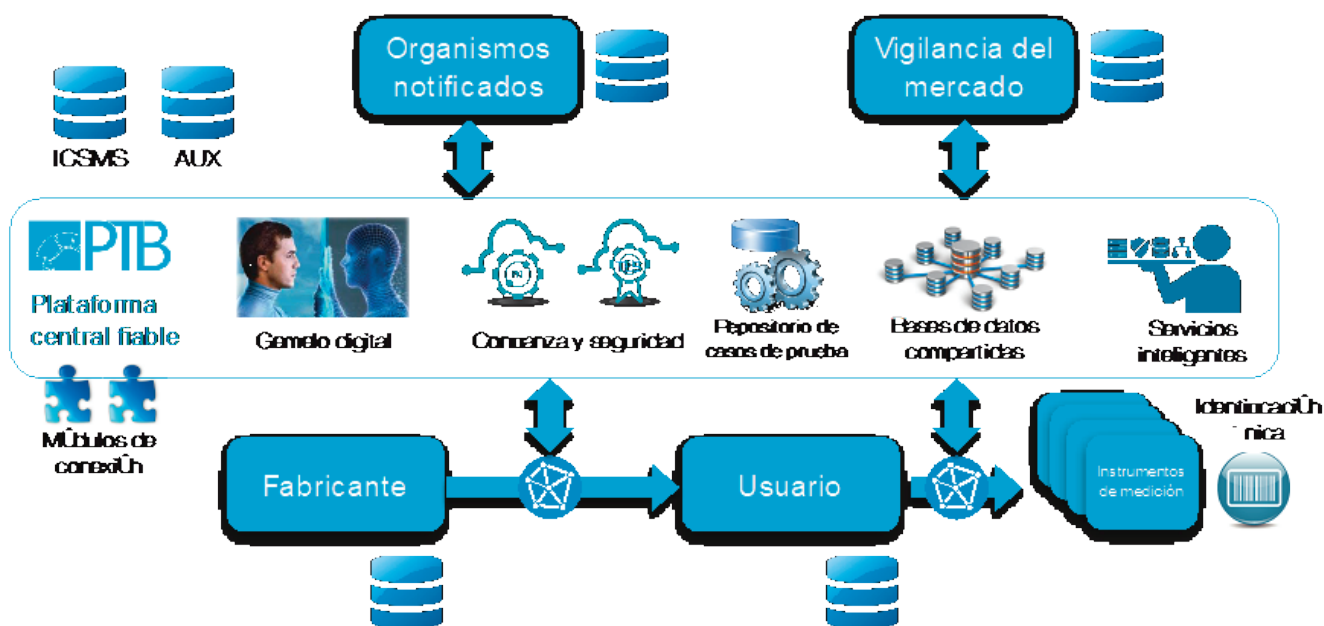
visualización – ofrece a los fabricantes una amplia gama de posibilidades, pero, al mismo tiempo, esto representa un gran obstáculo tecnológico para la supervisión del mercado. En la dosimetría, por ejemplo, se utilizan casi sin excepción dosímetros móviles y basados en red. El dosímetro móvil, que está conectado con un ordenador de sobremesa, se pone en contacto con una infraestructura de nube del fabricante a través del internet. De este modo, el fabricante puede generar resultados de medición a partir de los datos registrados, almacenarlos en una base de datos y actualizar el software del dispositivo para ajustar, por ejemplo, los parámetros de calibración. Este procedimiento se ha convertido en el estado actual de la técnica, pero no es compatible con la ley de medición y verificación alemana y las directivas de protección contra la radiación.

Además, la infraestructura distribuida, en red y parcialmente virtualizada – con sus 170 millones de dispositivos de medición ya existentes sólo en Alemania – ofrece amplias posibilidades en el ámbito de la aprobación y vigilancia del mercado para la utilización de las soluciones “Big Data” basada en los datos acumulados durante el ciclo de vida del dispositivo de medición. Actualmente, estas bases de datos están altamente distribuidas, no están interconectadas y son muy heterogéneas (datos de medición, datos administrativos, datos de servicio). Al establecer una infraestructura de la calidad digital como “Metrology Cloud” (nube de metrología), se puede lograr la mejora digital de la metrología legal: acoplamiento de infraestructuras de datos existentes; acceso diferenciado de todos los socios a la “Nube de Metrología” como base de datos y punto de acceso seguro; nuevos conceptos para la coordinación, concentración, simplificación, armonización y el aseguramiento de la calidad de los servicios metrológicos.

Comenzando con un núcleo de confianza de esta infraestructura digital en el PTB, la “Nube de Metrología” se va a desarrollar gradualmente en una “Nube de Metrología Europea” para apoyar la idea del “Digital Single Market” (mercado único digital). Esta idea se ve estimulada mediante la solicitud de un proyecto conjunto europeo de tres años en el marco del programa EMPIR bajo “Horizon 2020”. El núcleo de confianza incluye la representación digital de cada tipo o instrumento de medición, garantiza una comunicación segura y una identidad única, proporciona soporte para el monitoreo del mercado y ayudará a racionalizar los procesos administrativos existentes. El concepto de la “Nube de Metrología Europea” está firmemente respaldado en el informe del Consejo Científico.

En las leyes y los reglamentos que afectan directamente el campo de actividades del PTB, por ejemplo, el campo de la aprobación de modelos de máquinas tragaperras (SpielV = ordenanza de juegos de azar) o de la evaluación de la conformidad de dispositivos de medición (MessEG, MessEV), se requieren **dictámenes sobre la seguridad informática** que han de ser emitidos por la BSI (Oficina Federal para la Seguridad en la Tecnología de Información o sea BSI, por sus siglas en alemán), un organismo de inspección reconocido por la BSI o un organismo comparable. Aquí se definen los bienes dignos de protección y con eso, se trazan estrategias de evaluación que no estén dentro del horizonte de la BSI, de un organismo de inspección aprobado por la BSI o de un organismo comparable. Esta deficiencia se puede compensar mediante una unidad de servicio dentro del PTB. El grupo de trabajo “Máquinas tragaperras” ya evalúa y apoya los dictámenes de seguridad informática de los fabricantes de máquinas de juego en el ámbito

Concepto de la “Nube de Metrología” como plataforma central fiable



de la homologación según la ordenanza “SpielV”. El grupo de trabajo “Software metrológico” evalúa y apoya los análisis de riesgo del software y de los componentes de TI de los fabricantes de dispositivos de medición en el marco de la evaluación de la conformidad. En la actualidad, ambos grupos de trabajo se encargan de la actualización y publicación de los vectores de ataque actuales. Aunque la BSI publica regularmente informaciones respecto a amenazas generales, los bienes a ser protegidos en las áreas reguladas suelen ser tan especiales que sólo el PTB puede identificar las amenazas correspondientes. Esta tarea también incluye el asesoramiento de los centros de inspección reconocidos por la BSI o de un organismo comparable en la preparación de los dictámenes sobre la seguridad. Esta evolución sugiere que, en el marco de la “Agenda Digital”, otras áreas de actividad del PTB con mandato legal también serán afectadas por la necesidad de evaluar los riesgos de seguridad de la TI. Por consiguiente, se pretende establecer un grupo de trabajo “Evaluaciones de seguridad metrológica y análisis de riesgos” con carácter de prestación de servicios para todo el PTB que puede actuar independientemente como **organismo de inspección reconocido por la BSI**.

El almacenamiento centralizado de datos es un requisito imprescindible para el uso eficiente de los modernos métodos de análisis de grandes datos, que ya se utilizan con éxito para aumentar la eficiencia en el área no regulada de la metrología. Los conceptos desarrollados para el “**mantenimiento predictivo**” también pueden aplicarse para una organización más eficaz del sistema de medición, verificación y calibración donde, en general, se imponen plazos rígidos sobre la base de inspecciones aleatorias. Mediante

el desarrollo de métodos de modelización estadísticos adecuados se podrían establecer pronósticos continuos y un aseguramiento de la calidad de la precisión de medición de toda la infraestructura de medición también para el sistema de medición y verificación. Esto exigiría, sin embargo, investigaciones preliminares en el PTB para preparar un cambio sostenible de la ley de medición y verificación. El departamento “Modelización Matemática y Análisis de Datos” ya asesora a asociaciones, laboratorios DAkkS y la vigilancia del mercado, proporcionando peritajes y procedimientos estadísticos. Sin embargo, la elaboración necesaria de procedimientos para el “mantenimiento predictivo” va mucho más allá.

Infraestructura de la calidad

La infraestructura de la calidad (**metrología, normalización y acreditación**) se ve afectada en su totalidad por la digitalización; actualmente, los desafíos más importantes se observan en el campo de la normalización y la calibración, como parte metrológica de la acreditación. En la “Cumbre Nacional de la TI 2015”, se presentó, por lo tanto, el documento de posición „**Leitplanken für die digitale Souveränität**“ (Límites para la soberanía digital) [37]; este documento especifica tres requisitos esenciales para mantener la competitividad: una infraestructura eficiente y segura, el dominio de competencias y tecnologías claves, así como un marco de la soberanía digital abierto a la innovación. En las tres áreas, se requiere una infraestructura de la calidad en su totalidad para garantizar la fiabilidad y confianza en la medición correcta. Por una parte, esto se refiere a la infraestructura de la comunicación en la que, en el futuro, la fiabilidad de las mediciones



Jerarquía de calibración en la República Federal de Alemania

de alta frecuencia será un requisito previo para una expansión sostenible de la red [38]. Por otra parte, se necesita el sistema de calibración en su conjunto para crear un marco eficiente, innovadora y abierto a la tecnología, con el fin de poder estimular la innovación [4]. El dominio de las competencias clave en las áreas de la calibración, de la seguridad de la TI, de la tecnología de medición y del análisis de datos es la base para una estandarización que se oriente a la demanda. En consecuencia, el gobierno federal aprovechó su presidencia del G20 en 2017 para abordar la **normalización en la transformación digital** como tema clave [39]. En los debates de expertos que tuvieron lugar en el PTB se advirtió repetidas veces que el llamado “**capitalismo de plataforma**”, que puede resultar de la posición dominante de algunas empresas en el mercado, amenaza sustancialmente a las PYME. Este problema se puede resolver exclusivamente mediante el establecimiento de normas flexibles y fiables y una estandarización correspondiente. Esto es particularmente importante en una economía globalizada para no limitar las posibilidades de acción de las empresas alemanas y europeas por parte de otros competidores globales. Además, un Libro Blanco actual de la CEI consta que el éxito de la visión del “Internet de las cosas” con operadores altamente automatizados sólo puede lograrse mediante normas adecuadas [40].

En el área de la **acreditación**, el PTB juega un papel clave para los laboratorios de calibración acreditados, debido a la trazabilidad necesaria al SI. La distribución de las responsabilidades entre el PTB y el DAkkS (Organismo Alemán de Acreditación) con más de 400 laboratorios

acreditados (así como la vigilancia del mercado con las autoridades de verificación) se basa en la jerarquía de calibración en Alemania, encabezada por el PTB, y en la norma internacional ISO 17025 [41] que establece los requisitos esenciales para los laboratorios de calibración acreditados. En principio, esta norma es abierta a la tecnología y permite el uso de formatos digitales. En el proceso de la digitalización, los aspectos de la información digital y de los canales digitales de la comunicación son cada vez más importantes, también para satisfacer las exigencias crecientes de la industria. Mediante la transformación digital del sistema de calibración, el PTB puede apoyar masivamente la digitalización de la economía y de la industria, acompañando los procesos digitales de negocio con interfaces digitales correspondientes en la cadena de medición y en la infraestructura de la calidad.

Para el PTB, como organismo oficialmente responsable del extremo superior de la jerarquía de trazabilidad, el desarrollo de un **certificado de calibración en formato digital** representa una tarea esencial. Pero, en el sentido de la segunda ola de la digitalización, un certificado de calibración en formato digital no es solamente un documento electrónico constituyendo el equivalente del certificado en papel, sino una representación virtual de la información relevante para el certificado de calibración. En particular, esto significa que los datos utilizados en la calibración (por ejemplo, factor de escala, intervalos de temperatura, linealidad) deben ser legibles por máquina y procesables de manera estandarizada. Esto hace posible utilizar la información de la



Concepto de un certificado estandarizado de calibración en formato digital

calibración automáticamente en escenarios de la Industria 4.0. Por ejemplo, un sensor en una planta se podría utilizar añadiéndolo simplemente a la red de sensores existente, y el software para el control de la planta se adaptaría automáticamente, sobre la base de las informaciones digitales de la calibración (“plug’n’measure”). Así, el “**gemelo digital**” del sensor se genera automáticamente a partir del certificado digital de la calibración. Para el desarrollo, el establecimiento y la amplia utilización de los certificados digitales de calibración, es necesario fijar especificaciones sobre la estructura, el contenido, las unidades permitidas, las interfaces, la validez y seguridad de la comunicación de datos y los sellos y las firmas digitales. En este contexto, la autenticidad y protección criptográfica, por ejemplo mediante una gestión de firmas digitales, desempeñan un papel decisivo. Recientemente, el marco jurídico para el reconocimiento a escala europea y la clasificación jurídica de las firmas y sellos digitales ha sido establecido por el Reglamento de la UE relativo a la identificación electrónica y los servicios de confianza para las transacciones electrónicas en el mercado interior (eIDAS-VO 910/2014).

“La digitalización de todas las áreas de la ciencia y el gran dinamismo de las técnicas digitales requieren estandarizaciones, especialmente para datos y metadatos, formatos de intercambio, interfaces, modelos de datos, lenguajes extensibles de marcado y vocabularios.”

(Consejo de la Infraestructura de Información, 2016)

Mientras que el certificado de calibración en formato digital asegura la diseminación correcta de las unidades verticalmente a lo largo de la cadena de trazabilidad en la jerarquía de calibración, también son necesarios conceptos para el intercambio de información horizontal correcto. Esto significa, entre otras cosas, que se deben desarrollar e implementar conceptos para la transmisión de informaciones y datos basados en el SI en **redes IoT** (internet de las cosas). La interpretación automatizada y sin errores de los datos requiere no sólo una transmisión sin errores, sino también una interpretación fiable y legible por máquina de los datos relativos al tamaño, la dimensión, unidad y, si es necesario, la **indicación de la incertidumbre de medida**. Hasta ahora, sin embargo, los formatos de datos se aplican sin una implementación consistente para los tipos de datos junto con los valores numéricos, o los enfoques existentes son propietarios, específicos de un área científica o un lenguaje de programación y, por lo tanto, no son interoperables. Mediante el desarrollo de un **formato estandarizado de metadatos**, se

puede garantizar el intercambio interoperable de información metrológicamente relevante sobre los datos numéricos para la interpretación y evaluación automatizada y fiable de datos fácticos numéricos. Para este fin, el formato de metadatos debería ser abierto, ampliamente aplicable y flexible en su implementación, formulando los requisitos esenciales necesarios para el intercambio fluido de datos fácticos en redes de información automatizadas. Estos formatos de metadatos también ayudarían a garantizar la interoperabilidad de las bases de datos en el análisis de Big Data [42]. Por regla general, en el análisis de grandes datos (Big Data) se analizan datos procedentes de fuentes distintas, por ejemplo, en la correlación de datos. En este punto, debe garantizarse que los datos sean compatibles entre sí (unidad, dimensión, incertidumbre de medida) para poder obtener resultados de análisis fiables. En la metrología, los primeros esfuerzos – por ejemplo, por parte del NIST en los EE.UU. – se limitan a la visualización de diferentes fuentes de datos (“findable”, en inglés), ya que la interoperabilidad se considera un obstáculo extremadamente alto. Así, por ejemplo, se está elaborando un “International Metrology Resource Registry” (registro internacional de recursos de metrología) como una base de metadatos para aumentar la visibilidad de las bases de datos metrológicas [43]; esto se realiza en una cooperación internacional de varios INM (Institutos Nacionales de Metrología) con la participación esencial del PTB. Por regla general, se desarrollan soluciones específicas de la aplicación para la interoperabilidad de bases de datos, que luego se evalúan para una situación concreta. Mediante la creación de formatos armonizados apropiados, el análisis automatizado de datos podría ser apoyado significativamente. Sin embargo, un primer avance del NIST con el formato de datos “UnitsML” [44] fracasó. Según el NIST, esto se debió sobre todo a la falta de recursos humanos. El desarrollo de este formato también demostró que la complejidad de la representación de datos interoperables es muy alta y requiere competencias correspondientes y compromisos a largo plazo.

Por otra parte, las aprobaciones automatizadas a través de interfaces digitales jugarán un papel importante en el futuro para apoyar los procesos de negocio “empresa a empresa” (B2B, en inglés). En la actualidad, por ejemplo, el PTB ofrece una prueba automatizada de algoritmos dentro del proyecto TraCIM [45], basada en datos de referencia del PTB, para ciertas tareas de la tecnología de medición de coordenadas. El sistema permite la comprobación remota automática de un algoritmo con la creación de un sello de verificación correspondiente. En el futuro, una gran parte de la industria esperará este tipo de

ofertas por parte del PTB, ya que la industria está transformando digitalmente sus propios procesos precisamente de dicha manera.

En muchas áreas, la transformación digital está causando conflictos entre las posibilidades tecnológicas y el marco legal. Un ejemplo son las instalaciones de producción que están sujetas a la protección contra explosiones y donde el PTB – según su mandato y junto con el BAM (Instituto Federal de Ensayo de Materiales) – desempeña, en parte, un papel de protagonista a nivel mundial. Debido a la normativa 2014/34/EU como manifestación jurídica de la IEC 60079, por ejemplo, los fabricantes son obligados a someter los dispositivos electrónicos utilizados a una evaluación estricta de la conformidad. Las directivas subyacentes se basan en la suposición de que se trata de dispositivos estacionarios, pero se utilizan cada vez más los dispositivos móviles (p. ej. tabletas), en particular en el sector del mantenimiento. Aquí es donde se necesita el PTB, es decir en el desarrollo de arquitecturas de referencia adecuadas para realizar una modernización digital de la protección contra explosiones. Así pues, el desarrollo de **soluciones adecuadas basadas en software** puede ser una alternativa, utilizando clasificaciones de seguridad diferenciadas en función de la situación en vez de aplicar normas rígidas. En el PTB, los requisitos y sistemas de referencia lícitos permiten evitar el uso de dispositivos no aprobados.

De forma similar, surgen nuevas tareas en muchas otras áreas debido al mandato legal del PTB. Tanto en la medicina como en la vigilancia del medio ambiente, por ejemplo, se están utilizando cada vez más los sistemas de medición en red y los análisis en tiempo real, mientras que en la actualidad la trazabilidad está dirigida principalmente hacia el diagnóstico de laboratorio. Las nuevas tecnologías digitales permiten, por ejemplo, el **monitoreo en línea** en la medicina (“point-of-care diagnostic” o sea “diagnóstico de punto de atención”) y en el análisis ambiental (agua, aire, vehículos). Además, las vías de la comunicación digital ofrecen posibilidades de mantenimiento remoto, diagnóstico remoto y calibración remota. El seguimiento de la exactitud de los resultados de la medición, especialmente en el campo médico, es tan importante para los sistemas en línea como en los diagnósticos estacionarios de laboratorio. Esto requiere el desarrollo de métodos para la calibración de instrumentos de medición a través del control remoto, conceptos para la protección y transmisión fiable de datos, así como para la trazabilidad de los resultados de medición en el funcionamiento en línea o fuera de línea (a bordo). El PTB proporciona los patrones nacionales para el aseguramiento de la calidad en los diagnósticos de

laboratorio y, por lo tanto, debe hacerlo también en el campo de los métodos de diagnóstico y análisis modernos. Particularmente en el campo del análisis de gases de escape en motores de combustión, se anticipan nuevos desafíos para el PTB, debido al desarrollo de manipuladores digitales.

La transferencia del tiempo legal es una de las tareas soberanas del PTB. La transformación digital conlleva una serie de nuevos desafíos y posibilidades. Por lo tanto, los métodos con funcionamiento en tiempo real para el análisis de grandes conjuntos de datos (Big Data Analysis) aportarían nuevas informaciones respecto a los datos de medición registrados continuamente para la evaluación de relojes ópticos de alta precisión. Al mismo tiempo, la conexión en red de las industrias y los mercados digitalizados crea nuevos retos para la transferencia del tiempo. A partir de 2018, por ejemplo, la normativa europea sobre los mercados financieros controlados por algoritmos entra en vigor a través de la **Directiva MiFID II**, exigiendo el registro trazable de fecha y hora con una resolución de 1 μ s y una desviación máxima de 100 μ s de la hora UTC. Actualmente, no existe infraestructura metrológica en forma de laboratorios acreditados en Alemania. Entre los INM, ya se realizan mediciones de tiempos de propagación de la señal a través de receptores transportables y calibrados con baja incertidumbre para determinar las contribuciones UTC. Una forma de apoyar al sector financiero alemán es, por lo tanto, el desarrollo de procedimientos de calibración para el uso en la red de las instituciones financieras, sobre la base de los métodos de comparación entre los INM y el desarrollo de métodos de monitoreo y documentación. Mediante la cualificación y acreditación de los laboratorios de calibración, la tarea puede ser asumida permanentemente por laboratorios externos. Los preparativos para este apoyo por parte del PTB ya han comenzado.

En las redes del “Internet de las Cosas” (“Internet of Things”), los datos se recogen y procesan continuamente. Especialmente en los entornos de la “Industria 4.0”, con la ambición de un análisis de datos en tiempo real para la producción automatizada, la **sincronización del tiempo** juega un papel decisivo [46]. En principio, se pueden derivar marcas de tiempo adecuadas de una referencia de hora local que se dejan asignar a los datos. Sin embargo, en redes empresariales y globales, este enfoque requiere la sincronización de dichas referencias temporales para poder correlacionar cronológicamente los datos registrados de forma global. En las áreas donde la sincronización del tiempo es técnicamente necesaria o exigida por la ley como, por ejemplo, en la industria de telecomunicaciones

o energía, ya se utilizan los medios necesarios para la sincronización de las referencias temporales y el hardware correspondiente. Sin embargo, el requisito previo para el amplio uso de las tecnologías correspondientes, como el protocolo NTP (indicación del tiempo a través de redes con tiempo de ejecución del paquete variable) o el **protocolo PTP** (enfoque en una mayor precisión y redes localmente limitadas), es su implementación fácil. Muchos fabricantes de componentes de red activos están usando cada vez más soluciones de hardware PTP en sus dispositivos. En el futuro, el PTB debe reflejar este desarrollo de manera adecuada en la transferencia del tiempo legal. El desarrollo de una variante del **protocolo WebSocket** sirviendo como complemento al protocolo NTP también sería una alternativa, ya que posee el amplio soporte de varios navegadores y lenguajes de programación y permite una implementación fácil en el software. Por lo tanto, está predestinado para su uso en el “IoT” (internet de las cosas) también en el sector industrial, donde las tecnologías Web se utilizan a menudo. El desarrollo de un servicio WebSocket correspondiente del PTB permitiría la transferencia del tiempo para una gran variedad de aplicaciones en el “IoT” y otras redes.

Metrología en el análisis de grandes volúmenes de datos

Todos los análisis y estudios llegan a la conclusión de que el conocimiento o las informaciones sólo pueden ser generados por un análisis adecuado de los datos. En consecuencia, el BMWi apoya la iniciativa de financiación „**Smart Data – Innovation aus Daten**” [6] (Smart Data – Innovación a partir de datos) para el desarrollo de procesos eficientes con 30 millones de euros, con el fin de sacar de la enorme cantidad de datos informaciones que sean económicamente utilizables. Junto a la seguridad de la TI, el manejo eficiente de las cantidades de datos, que están creciendo rápidamente, es un tema central de la digitalización [47]. Con sus memorias de datos baratas, sus sensores digitales y una comunicación de datos de bajo coste, la comunidad empresarial cada vez más interconectada lleva consigo un volumen de datos rápidamente creciente [48]. A menudo, se refiere a los datos como el “petróleo del siglo 21” o “suelo fértil”.

“La gran mayoría de todos los datos (en realidad hasta el 90%) se ha generado en los últimos dos años.”

(Realizando la nube de ciencia abierta europea, 2016) Science Cloud 2016

Así, nuevos métodos de medición como, por ejemplo, en la imagenología médica, la tomografía computarizada industrial o la medición de la densidad de la radiación de superficies luminosas y reflectantes, conducen a **cantidades de datos de rápido crecimiento**. En muchos casos, la dimensionalidad de la magnitud de medida a determinar aumenta de la misma manera. Por ejemplo, el flujo luminoso de una fuente de luz se puede medir espacialmente resuelto por medio del goniómetro de campo cercano del PTB. En este caso, la magnitud de medida es altamente dimensional y no puede ser manejada con los métodos establecidos de la infraestructura de la calidad. Por otro lado, tales datos de alta dimensión se utilizan, por ejemplo, en simulaciones para diseñar virtualmente la geometría de componentes conductores de luz. En el marco de la transformación digital de la industria, la trazabilidad a las unidades del SI y, por lo tanto, el PTB tendrán que desempeñar un papel clave en el futuro.

En el PTB, la investigación transversal en los campos de la modelización matemática, del análisis estadístico de datos y de los métodos para medir la incertidumbre dentro de un departamento central denominado “Modelización matemática y análisis de datos” proporciona la base para una serie de proyectos y guías especializados. A través de su colaboración en comités para la armonización del análisis de datos metrologógicos, el PTB sigue apoyando la interconexión de los diferentes campos de aplicación. Debido a los volúmenes de datos crecientes, la dimensionalidad de las magnitudes de medida y los procedimientos de análisis más complejos, el PTB ha de hacer frente a exigencias rápidamente crecientes. En un número creciente de aplicaciones, se plantearán desafíos respecto a la evaluación de los datos de medición, debido a las estructuras complejas de los datos con una alta dimensionalidad, variabilidad y volatilidad y a las diferentes **calidades de datos**. En lo que concierne la dimensionalidad y el tiempo de cálculo, los procedimientos reconocidos en la metrología para la determinación de la incertidumbre ya alcanzan sus límites. Esto es el caso en muchas aplicaciones. La digitalización y los procedimientos de medición basados en ordenadores están reforzando esta tendencia y conducen a cantidades de datos y espacios de parámetros cada vez mayores en sistemas de medición distribuidos, **simulaciones por ordenador** complejas o datos médicos multiparamétricos (imágenes, análisis de proteínas y genes o bioquímica). El entrelazamiento cada vez más estrecho entre la medición y el análisis de los datos de medición implica una creciente importancia de los métodos matemáticos y estadísticos. La transferencia de

los procedimientos establecidos y reconocidos a situaciones con grandes cantidades de datos (por ejemplo, mediante simulaciones) y largos tiempos de cálculo (por ejemplo, debido a modelos elaborados) es un gran desafío. Para facilitar una transición suave entre pequeñas y grandes cantidades de datos, se han de desarrollar herramientas matemáticas y estadísticas escalables, completando así los procedimientos establecidos.

Una posibilidad es la **reducción dimensional**. Es decir, las estructuras existentes en los datos se explotan selectivamente con el fin de reducir la cantidad de datos mientras que el contenido de la información sigue siendo el mismo. Como esto requiere un conocimiento profundo de la medición, así como el desarrollo conjunto de métodos de medición y métodos de evaluación más eficientes, es necesario el trabajo de investigación conjunta del departamento de “Modelización Matemática y Análisis de Datos” y de las disciplinas experimentales. En muchas aplicaciones, los nuevos métodos de medición asistidos por ordenador en el Departamento de “Fotometría y Radiometría Aplicada” conducen a grandes cantidades de datos en la calibración, como por ejemplo en la medición del llamado “cuerpo de radiación” de una fuente de luz donde, en una sola medición, se obtienen aproximadamente 100 GB de datos de medición. Las ampliaciones ya previsible de los métodos de medición utilizados además permiten mediciones espectralmente resueltas, lo que conducirá a un aumento adicional significativo de las cantidades de datos. También el Consejo Científico reconoce la necesidad significativa de investigación:

“Las mediciones producen inmensas cantidades de datos multidimensionales, pero no está claro qué informaciones procesables se pueden derivar de los mismos. Sería deseable una intensificación de los esfuerzos de investigación con respecto a la evaluación y el uso de los datos.”

(Consejo Científico, 2017)

En aplicaciones donde la reducción de la dimensionalidad de los datos no hace sentido debido a las aplicaciones deseadas, se deben desarrollar métodos practicables y fiables para **la transferencia de grandes cantidades de datos**. Aquí, no es la memoria de datos o la velocidad de transferencia de los datos que constituye un problema, sino más bien el formato de datos adecuado. El PTB, por ejemplo, ofrece mediciones trazables de patrones de reflexión, tal como lo requiere un gran número de productores de dispositivos y laboratorios de calibración y ensayo. Para las mediciones de la función de distribución de la reflectancia bidireccional de superficies se necesita un formato de datos estandarizado

y uniforme que puede representar los datos altamente dimensionales y complejos, incluyendo las incertidumbres de medida, y que permite un análisis de datos fiable. La interpretación de los datos asistida por ordenador y sin errores debe ser asegurada. Sobre la base de la infraestructura de medición y la experiencia del departamento “Imagen y Óptica Física” y sus muchos años de colaboración exitosa con el departamento “Modelización Matemática y Análisis de Datos”, se pueden desarrollar formatos de datos y métodos de análisis adecuados.

Los métodos para el “Data mining” (la minería, o sea, la extracción de datos) y otros métodos de correlación son métodos ampliamente utilizados, por ejemplo, en el análisis de datos en tiempo real en la “Industria 4.0”. Aquí, los datos de los sensores se evalúan y correlacionan continuamente. En la metrología, un ejemplo sería el **análisis de la correlación de datos** de módulos fotovoltaicos a lo largo de su cadena de valor. Mediante el desarrollo correspondiente de métodos adecuados de medición y trazabilidad, se pueden desarrollar procedimientos de análisis de datos que, por ejemplo, permitirían una reacción rápida en caso de fallo y una conexión de las fallas de alimentación en el parque solar con la fabricación de obleas. Ya que esto requiere conocimientos y desarrollos bien fundados en el campo de los métodos de medición, así como el desarrollo de métodos matemáticos y estadísticos adecuados, es necesario un trabajo de investigación conjunta de los departamentos de “Fotometría y Radiometría Aplicada” y “Modelización Matemática y Análisis de Datos”.

Ejemplos de resultados de medición de alta dimensionalidad también se encuentran en muchas áreas de la nanometrología, por ejemplo, en la modelización del contraste de señal mediante métodos de Monte Carlo para la evaluación de mediciones en nanoobjetos en microscopios electrónicos de barrido. Además, las técnicas de imagen se utilizan cada vez más en la tecnología de medición dimensional y en la tecnología de medición óptica de superficies, produciendo grandes cantidades de datos que deben ser procesados. En estas áreas, la determinación de las influencias a la incertidumbre a menudo sólo es posible mediante complicados **cálculos de modelo**. Generalmente, esto requiere una reducción dimensional para el manejo simplificado de los datos. Enfoques similares se aplican cada vez más en el entorno de la producción, donde se utilizan, por ejemplo, métodos de medición óptica. Esto, a su vez, requiere el desarrollo de métodos para poder analizar la calidad de la incertidumbre de medida cuando se utilizan procedimientos que reducen la dimensión. Así, el desarrollo de procesos genéricos siempre depende

de aplicaciones concretas y, por lo tanto, debe realizarse junto con el desarrollo del método de medición. Los métodos de medición adaptados ya pueden conducir a una reducción suficiente de la dimensión, entre otras cosas, mediante una selección adecuada de los puntos de medición.

En la investigación, se observa un número creciente de publicaciones en el campo del análisis de grandes cantidades de datos y del análisis automatizado de **Big Data**, por ejemplo, a través del aprendizaje mecánico y las redes neuronales artificiales [11] [49]. Por regla general, los métodos actualmente desarrollados se basan en la teoría establecida de redes neuronales artificiales, pero utilizan un número cada vez mayor de capas ocultas ('hidden layers', en inglés) entre la entrada y la salida [11]. Estos métodos se conocen comúnmente como "**deep learning**" (aprendizaje profundo). Debido a la creciente disponibilidad de hardware especializado, de software libremente disponible y de conjuntos de datos muy grandes, los métodos del "aprendizaje profundo" son cada vez más relevantes en un número creciente de ámbitos [50]. Desde el punto de vista de la infraestructura de la calidad y, en particular, de la metrología, es el aspecto de la fiabilidad que es de gran relevancia. Sin embargo, todavía no se dispone de un tratamiento metrológico de estos métodos de análisis de datos. Incluso fuera de la metrología, el estudio de la fiabilidad del análisis de datos y el desarrollo de métodos para evaluar cuantitativamente la calidad de los resultados es un tema de la investigación actual como, por ejemplo, en el Fraunhofer HHI (Instituto de Ingeniería de Comunicaciones Heinrich Hertz) en Berlín [51]. En general, sin embargo, el desarrollo de métodos para la determinación de incertidumbres y declaraciones de calidad en el "aprendizaje profundo" todavía está en una etapa temprana. Adicionalmente, en las áreas críticas, se plantea la cuestión respecto a la posibilidad de poder manipular los resultados del aprendizaje automático mediante la modificación específica de los datos de entrada. En el futuro, esta área de investigación, que se llama "adversarial learning" [52] (aprendizaje de procedimiento contradictorio), también tendrá relevancia para la metrología.

Metrología de los sistemas de comunicación para la digitalización

La disponibilidad de vías de comunicación fiables, eficientes y flexibles es un requisito previo muchas veces citado para el éxito de la transformación digital, véase p. ej. [38]. Sobre todo, la expansión de la **tecnología 5G** se está llevando adelante con gran rapidez. Así, por ejemplo, la Asociación de

Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Tecnología de la Información (VDE, por sus siglas en alemán) cita a expertos del sector que consideran realista un lanzamiento de 5G en Alemania antes de 2020 [53]. El G20 también hizo hincapié en la necesidad de la rápida expansión de 5G a través de un apoyo gubernamental específico en su análisis "Key Issues for Digital Transformation in the G20" (Temas clave para la transformación digital en el G20), e incluso recomendó un despliegue para 2018 [39]. Actualmente, el término "tecnología 5G" se utiliza generalmente para englobar las tecnologías de comunicación basadas en radiofrecuencia en el espectro de frecuencias de megahercios o gigahercios. Todavía no existe un 'estándar 5G' final, así que parcialmente queda abierta la pregunta por los requisitos concretos a cumplir. Por ejemplo, la "Next Generation Mobile Networks Alliance" (alianza de redes móviles de la próxima generación) define los requisitos para un estándar 5G como sigue: disponibilidad de muy altas velocidades de transmisión de datos (100 Mbit/s a 1 Gbit/s) para grandes grupos de usuarios simultáneamente, varios cientos de miles de conexiones inalámbricas simultáneas, un uso mucho más eficiente del rango espectral comparado con 4G, una latencia significativamente menor en comparación con LTE y una mayor eficiencia en la transmisión [38].

"5G operará en un entorno altamente heterogéneo caracterizado por la existencia de múltiples tipos de tecnologías de acceso, redes de múltiples capas, múltiples tipos de dispositivos, múltiples tipos de interacciones de usuarios, etc."

(NGMN Libro Blanco 5G)

En la comunicación 5G y en la modulación digital, las **magnitudes de medida de alta frecuencia** son generalmente muy complejas, no lineales, estocásticas y altamente dimensionales. Por ejemplo, la modulación de amplitud en cuadratura (QAM) con un número de constelación alto (64-4096) desempeña un papel cada vez más importante en la tecnología de comunicaciones de alta frecuencia. La tecnología de transmisión y recepción necesaria para ello debe caracterizarse de forma muy precisa para minimizar los errores de transmisión. Así, un uso eficiente del espectro electromagnético con respecto al alcance, la capacidad y la densidad del canal requiere el conocimiento de características no lineales y estocásticas en el rango espectral (contenido armónico, distancia señal a ruido, grado de intermodulación pasiva, ruido de fase del oscilador, etc.). Las mediciones trazables de estas magnitudes no lineales estocásticas son, por lo tanto, el requisito previo para la **calibración de dispositivos de medición de alta frecuencia**

y el desarrollo y la expansión de sistemas de comunicación digitales.

Hasta ahora, la trazabilidad existe casi exclusivamente para las magnitudes básicas (señales de ondas continuas no moduladas, caracterización lineal), aunque los dispositivos de medición comerciales para parámetros no lineales se desarrollan también en Alemania. La incorporación de tales instrumentos de medición en la jerarquía de calibración significaría una ventaja competitiva significativa para las empresas correspondientes. En consecuencia, la necesidad de una ampliación del alcance de la acreditación de los laboratorios DAkkS para parámetros no lineales y estocásticos está aumentando actualmente, debido a la digitalización. De acuerdo con la jerarquía de calibración, sin embargo, el requisito previo para esto es el establecimiento de la trazabilidad correspondiente de tales parámetros en el PTB.

En la transformación a redes 5G, las matrices de antena con tecnología MIMO (entrada múltiple, salida múltiple) también juegan un papel cada vez más importante en la tecnología de medición de antenas hasta el rango de ondas milimétricas [54]. El aseguramiento de la fiabilidad de dichos sistemas requiere la caracterización metroológica de la tecnología de transmisión y recepción utilizada, así como la calibración trazable de los dispositivos de medición utilizados para la caracterización. Por ejemplo, es necesaria una investigación de la implementación técnica del agrupamiento de canales con variación temporal a diferentes frecuencias y condiciones de propagación (MIMO masivo).

El desarrollo hacia sistemas inteligentes de autoconfiguración con altas exigencias de interoperabilidad en protocolos de comunicación altamente complejos exige la trazabilidad de los parámetros de señal como, por ejemplo, la profundidad y amplitud de la modulación, la magnitud vectorial del error (Error-Vector-Magnitude o EVM, por sus siglas en inglés) y las tasas de error (modulación / bit / tasa de tramas erróneas). El desarrollo continuo de los dispositivos de medición y de los sistemas de antena requiere un conocimiento exacto del tiempo de tránsito y de la atenuación del canal y de la ampliación de pulso de los caminos de propagación individuales. La disponibilidad de servicios metroológicos correspondientes en Alemania sería una ventaja competitiva en un mercado actualmente dominado por los Estados Unidos y China. Entre los trabajos preparatorios correspondientes del PTB figuran el THz Communication Lab¹, (Laboratorio de Comunicaciones Terahertz), mediciones de la magnitud del vector de error mediante osciloscopios de tiempo real, la calibración de

analizadores de señales vectoriales, la medición de **parámetros de modulación** óptica convertidos eléctricamente, así como los primeros trabajos para la caracterización de “Smart Antennas” (antenas inteligentes).

El NIST ya ha reconocido las necesidades de investigación necesarias desde hace mucho tiempo y ha invertido masivamente (unos 300 millones de dólares estadounidenses) en el “Communications Technology Lab” y un programa de investigación llamado “mmWave, 5G & beyond”[55]. Los trabajos del NIST se han diseñado para un periodo de investigación de al menos 20 años. El NPL también está intensificando sus actividades de investigación en esta área y acaba de crear un centro de investigación junto con la Universidad de Surrey, llamado “Nonlinear Microwave Measurements and Modelling Laboratories”².

Metrología para simulaciones e instrumentos virtuales de medición

En la metrología, las simulaciones y los experimentos virtuales ya se han establecido desde hace algún tiempo en varios campos de aplicación. En la **tecnología de medición de coordenadas**, por ejemplo, la determinación de la incertidumbre basada en simulaciones para tareas de medición definidas está cubierta por la ISO 15530-4 [56]. Con la **máquina virtual de medición de coordenadas (VCMM, por sus siglas en inglés)**, un software de evaluación para dispositivos de medición de coordenadas, el PTB posee un método de referencia de desarrollo propio que, por ejemplo, ha sido implementado por grandes empresas productoras como Zeiss y Hexagon en sus dispositivos de medición de coordenadas, pero que también ha sido transferido a los laboratorios de calibración DAkkS [57]. La evaluación de los datos medidos, incluyendo una determinación de incertidumbres de medida, se realiza de forma automatizada, eficiente y con una interfaz digital para el procesamiento posterior en la infraestructura en red. La independencia del fabricante del PTB y la confianza en su posición de liderazgo a nivel mundial en el desarrollo de software de evaluación basado en simulación para la determinación de la incertidumbre de medida son prerequisites ideales para una extensión futura de las posibilidades de aplicación. Al fin y al cabo, el objetivo es transferir el método del CMM virtual a todas las clases de instrumentos de medición relevantes en la producción para proporcionar declaraciones válidas sobre las incertidumbres de medida de los dispositivos de medición y sensores utilizados en el entorno de la producción según “Industria 4.0”. Aquí se intenta conseguir una cooperación estratégica entre los

¹ <http://www.tcl.tu-bs.de/>

² <http://n3m-labs.org>

departamentos “Metrología por coordenadas” y “Modelización Matemática y Análisis de Datos” para promover el desarrollo de métodos genéricos para la evaluación de datos de medición basada en simulación.

En el área de los métodos de medición óptica, el PTB – con su posición de liderazgo mundial en la metrología esférica óptica y plana, y la herramienta de simulación „**SimOptDevice**“ ya aplicada muchas veces con éxito para el rendimiento del haz óptico teniendo en cuenta las influencias mecánicas estáticas – cuenta con las habilidades necesarias para el desarrollo de una herramienta de simulación holística para instrumentos de medición de forma [58]. Principalmente, la estructura modular y la disponibilidad de las fuentes de software permiten un uso muy amplio para la realización de experimentos virtuales dentro del PTB. Ciertos métodos de medición se basan incluso necesariamente en una simulación físicamente correcta. Por ejemplo, el “**Tilted wave interferometer**” (interferómetro de ondas inclinadas), desarrollado en la Universidad de Stuttgart y también operado en el PTB para la metrología esférica, utiliza una simulación de la trayectoria del haz para determinar la desviación del objeto de prueba de una plantilla de diseño dada digitalmente [59] [60]. En este caso, el resultado de medición virtual obtenido por la simulación se compara con el resultado real para obtener, sobre la base de las desviaciones, la estructura superficial real del objeto de prueba. Uno de los desafíos más grandes en estos experimentos es asegurar la trazabilidad a las unidades del SI. Debido a la complejidad de la estructura física y a los métodos de simulación utilizados, existe una necesidad significativa de investigación.

Asimismo, hay un uso creciente de algoritmos en la recopilación y utilización de datos procedentes de sistemas de medición integrados en red para el control de la calidad y el **control automatizado de la producción**, por ejemplo, en la integración de métodos de la fabricación aditiva en el entorno de la producción con el objetivo de aumentar la eficiencia y mantener la competitividad. Como resultado, se plantean nuevos retos en cuanto a la trazabilidad y los factores de incertidumbre para los sistemas integrados de medición en red, entre otras cosas, debido al desarrollo de patrones para el uso en la medición y el control orientados a la aplicación. En particular, hay una creciente utilización de **procesos de fabricación aditiva** en los entornos industriales, además de los métodos establecidos, por ejemplo para aumentar la eficiencia. Tales procedimientos dejan un amplio margen para una mayor libertad de diseño y una optimización según diferentes criterios, debido a sus características de fabricación por capas. Sin

embargo, el desarrollo de “métodos de medición en proceso” adecuados para el control de la producción aditiva, así como la caracterización metrológica de la exactitud de la producción plantean unos desafíos importantes. Actualmente, el PTB está invirtiendo en instalaciones de producción correspondientes – por un lado, para una producción más eficiente y flexible en su propia construcción de equipos y, por otra parte, para la realización de proyectos de investigación metrológica. En el PTB, los primeros trabajos de investigación ya se llevaron a cabo en el marco del proyecto de investigación “Traceable in-process dimensional measurements”, que se concluyó en 2016 y fue financiado por la Comisión Europea.

Una consecuencia de los sistemas de medición en red es que los clientes están exigiendo cada vez más a los fabricantes de sensores cada vez más **sistemas de medición inteligentes**, que – equipados con el software correspondiente – puedan generar resultados de forma automatizada y, parcialmente, autónomamente e interactuar con otros sensores y dispositivos (compra de valores medidos en vez de dispositivos de medición). La creciente necesidad de resultados de medición precisos y fiables significa que también hay un número creciente de dispositivos de medición con interfaces digitales y el software de evaluación incorporado que han de ser calibrados, por ejemplo, en aplicaciones acústicas y dinámicas. Hasta la fecha, los equipos y métodos de medición en los institutos de metrología generalmente no están equipados para examinar dispositivos de medición en los que el valor de indicación ya ha sido sometido a un preprocesamiento. Esto constituye nuevos retos para los INM, sobre todo en los casos en que ni los algoritmos de evaluación ni los datos primarios análogos son directamente accesibles. Aquí, se necesitan nuevas capacidades de medición, así como nuevos enfoques para la evaluación de la conformidad.

Infraestructura tecnológica

En gran parte, las nuevas tareas identificadas para el PTB requieren un cambio en la infraestructura de la TI. Así, el establecimiento previsto de una “Nube de Metrología” requiere **sistemas de servidor potentes** con una seguridad de TI muy alta y un mantenimiento continuo para poder mantener la confianza existente en el PTB como “trustworthy core” (núcleo de confianza) en el concepto. Lo mismo es válido para el concepto de un certificado de calibración digital y las interfaces digitales a los datos de referencia del PTB.

El PTB ya ha comenzado los preparativos para la introducción de un **archivo electrónico** con el fin de establecer un sistema de almacenamiento de documentos electrónicos, necesario en la

transformación digital. La gestión prevista de documentos electrónicos proporciona una gestión centralizada y basada en servidor de los documentos internos, que incluye trabajo cooperativo, firmas digitales, control de acceso y métodos de archivo. Para este fin, un grupo de organización interdisciplinario adaptó los procesos correspondientes para todos los procesos de negocio internos del PTB que están basados en documentos al archivo electrónico de documentos. Se espera que los primeros proyectos piloto se inicien a principios de 2018, con una implementación gradual hasta aproximadamente finales de 2020. En la elaboración de las estructuras necesarias del proceso ya se deben tener en cuenta los conceptos previstos de un certificado de calibración digital e interfaces digitales de cliente para garantizar la compatibilidad de los sistemas.

El análisis de grandes conjuntos de datos y el procesamiento de problemas matemáticos y estadísticos de alta dimensión requieren un **servicio de TI adecuado para procesos con uso intensivo de datos**. Aquí, es necesario poder ofrecer soluciones de computación de alto rendimiento, computación paralela, almacenamiento escalable de alta disponibilidad y servicios de TI especiales, a nivel interdepartamental e intersectorial. Un desarrollo sostenible de estas tecnologías podría realizarse, por ejemplo, mediante el establecimiento correspondiente de modelos de pago internos para servicios especializados. Actualmente, el Instituto Federal para Investigación y Ensayos de Materiales (BAM, por sus siglas en alemán) también está en vías de elaborar un concepto. El intercambio de información y experiencias entre el PTB y el BAM ya se ha iniciado y debe seguirse en el futuro. El NIST en los EE.UU. ya cuenta con una oferta interna de servicios de TI para el **almacenamiento basado en la nube** y el archivo de datos de investigación de acceso público que se basa en un modelo de tarifas internas. No obstante, la experiencia del NIST muestra que un acceso fácil a estos servicios y una buena relación coste-beneficio son los requisitos necesarios para que estas ofertas sean utilizadas en la práctica. Esto puede lograrse, por ejemplo, mediante la adquisición de competencias en el desarrollo de software para trabajar de forma centralizada en el desarrollo de interfaces a datos, bases de datos y computación paralela y la estandarización de bibliotecas de software para tareas transversales científicas. A nivel nacional, se están desarrollando actualmente una serie de iniciativas, por ejemplo, de la Red Alemana de Investigación (DFN, por sus siglas en alemán) para crear infraestructuras en nube en forma de la llamada “Infrastructure as a service” (IaaS) (infraestructura como servicio)

y hacerlas disponibles de forma centralizada [61]. A través de contratos marcos, el PTB podría beneficiarse enormemente de estas estructuras. Sin embargo, las ofertas “IaaS” no reemplazan la necesidad de desarrollar interfaces de software y mantenerlas de forma sostenible. De lo contrario, las ofertas que se han comprado sólo pueden utilizarse de forma muy limitada, ya que los requisitos tecnológicos para su uso beneficioso son comparativamente altos.

Además del rendimiento de los sistemas informáticos y de su capacidad de almacenamiento, se considera que un concepto viable y uniforme para la **gestión de datos de investigación** es una “condición para una investigación excelente” (Conferencia de los Rectores de Centros Superiores). Correspondientemente, hay un número creciente de iniciativas de apoyo como, por ejemplo, del BMBF (Ministerio Federal de Educación e Investigación), para la investigación y el desarrollo de soluciones a los retos de la gestión de datos de investigación. Además, la Fundación Alemana de Investigación (DFG, por sus siglas en alemán) a nivel nacional y la Comisión Europea elaboran requisitos obligatorios para los proyectos subvencionados. Estos deben asegurar que los datos de investigación recopilados dentro del marco de tales proyectos se pongan a la disposición del público. A escala europea, se inició un paso hacia un paisaje armonizado europeo de datos de investigación mediante la iniciativa **“European Open Science Cloud”**. El organismo competente recomienda: “Recomendamos que el uso de instrumentos actuales y futuros en la programación de la investigación, incluido Horizon 2020, sólo apoye proyectos que aborden adecuadamente los problemas de la administración de datos para datos abiertos.” Esto significa que el PTB, como socio importante en muchos proyectos del programa Horizon 2020, requiere urgentemente una infraestructura eficiente para el manejo de los datos de investigación. Ya se han iniciado las discusiones preliminares internas, y los primeros requisitos identificados fueron la facilitación de un servicio de TI central para el aseguramiento sostenible y a largo plazo de los datos de investigación, un acceso flexible a los datos por personas o grupos, así como interfaces para el acceso externo a datos adecuados.

“En vista de la creciente intensidad de datos de la ciencia, la administración como requisito previo para el uso posterior está ganando importancia.”

(Consejo para la Infraestructura de la Información, 2016)

Uno de los objetivos de las iniciativas europeas es la localización y documentación de datos.

Para ello, las **estructuras de metadatos** y los estándares de datos armonizados son un requisito previo esencial. Con la iniciativa de GovData ya se comenzó, a nivel nacional, a definir un formato único para datos administrativos públicos. Ya existen diversos formatos de datos y varias estructuras de metadatos. Parcialmente, es posible desarrollar procedimientos automatizados para la generación de los así llamados “metadatos ricos”, por ejemplo, sobre la base de procesos bien definidos de la formación de los datos. Por lo general, esto es una tarea continua para

“personal altamente calificado con habilidades técnicas y conocimientos de la tecnología de información para asegurar, por ejemplo, la interoperabilidad entre los conjuntos de datos en un repositorio. El mero almacenamiento de datos no cuidados por los investigadores no es suficiente y reduce el potencial de valor añadido en el ciclo de vida de los datos”

(Consejo para la Infraestructura de la Información, 2016)

Bibliografía

- [1] „Digitalisierung,“ [Online]. Disponible: <https://de.wikipedia.org/wiki/Digitalisierung>. [Fecha de acceso: 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 y M. Esche, „Digitalisierung im gesetzlichen Messwesen,“ PTB-Mitteilungen, Nr. 4, 2016.
- [5] D. Schaudel, „Sensor 4.0 für Industrie 4.0,“ en 12. Dresnder 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] [8] McKinsey Global Institute, „The internet of things: mapping the value beyond the hype,“ 2015.
- [9] R. P. A. P. M. a. W. D. H. G. P. Sullivan, Operations & Maintenance Best Practices: A Guide to Achieving Operational Efficiency, 3 Hrsg., Pacific Northwest National Laboratory, U.S. Department of Energy, 2010.
- [10] pwc, „Industry 4.0: Building the digital enterprise,“ 2016 Global Industry 4.0 Survey.
- [11] Y. B. a. G. H. Yann LeCun, „Deep Learning,“ Nature, Tomo 521, pp. 436-444, 2015.
- [12] C. Eckert, „IT-Sicherheit und Industrie 4.0,“ IM+io Fachzeitschrift für Innovation, Organisation und Management, N° 1, 2014.
- [13] VDE Cybersecurity, „Funktionale Sicherheit und Informationssicherheit in Zeiten von Industrie 4.0 und Smart Home,“ [Online]. Disponible: <https://www.vde.com/topics-de/cyber-security/aktuelles/erfurter-tage-2017-nachbericht>. [Fecha de acceso: 29. 3. 2017].
- [14] M. Vickers, „Calibration Lab Vectors of Vulnerability,“ CAL LAB: THE INTERNATIONAL JOURNAL OF METROLOGY, p. 40, Septiembre 2016.
- [15] U. G. u. R. Meyer, „Konfigurationsanforderungen an Betriebssysteme,“ en Metrologische IT, Bd. 4, PTB Mitteilungen, 2016, pp. 33-43.
- [16] VDMA, „IMPULS - Digital vernetztes Denken in der Produktion,“ 2016.
- [17] Optech Consulting, „Industry Report of Photonik 2013,“ [Online]. Disponible: <http://www.spectaris.de/photonik-praezisionstechnik/presse/artikel/seite/branchenreport-photonik-2013-wirtschaftsdaten-einer-schlüsseltechnologie/presse-1.html>.
- [18] BMBF Photonik Forschung Deutschland, „2020 Agenda Photonik,“ VDI Technologiezentrum, 2016.
- [19] N. u. T. F. Leffler, „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]. Disponible: <http://www.gesetze-im-internet.de/messeg/index.html>. [Fecha de acceso: 30. 3. 2017].
- [21] BMJV, „Verordnung über das Inverkehrbringen und die Bereitstellung von Messgeräten auf dem Markt sowie über ihre Verwendung und Eichung,“ [Online]. Disponible: <http://www.gesetze-im-internet.de/messeg/index.html>. [Fecha de acceso: 30. 3. 2017].
- [22] European Commission, CEN, CENELEC, ETSI, „New Approach Standardisation in the Internal Market,“ [Online]. Disponible: <http://www.newapproach.org>. [Fecha de acceso: 29 3 2017].
- [23] Plattform Industrie 4.0, „Landkarte Industrie 4.0,“ [Online]. Disponible: <http://www.plattform-i40.de/I40/Navigation/DE/In-der-Praxis/Karte/karte.html>. [Fecha de acceso: 29 3 2017].
- [24] atos, „Journey 2020 - Digital Shockwaves in Business,“ 2017.
- [25] BMWi, BMBF, „Plattform Industrie 4.0,“ [Online]. Disponible: <http://www.plattform-i40.de>. [Fecha de acceso: 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]. Disponible: <http://lni40.de>.
- [28] BMWi, „Mittelstand 4.0,“ [Online]. Disponible: <http://www.mittelstand-digital.de/DE/Foerderinitiativen/mittelstand-4-0.html>. [Fecha de acceso: 29 3 2017].
- [29] DKE, VDE, DIN, „Standardization Council Industrie 4.0,“ [Online]. Disponible: <http://sci40.de>. [Fecha de acceso: 29 3 2017].
- [30] European Commission, „Digital Single Market,“ [Online]. Disponible: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/digitising-european-industry>. [Fecha de acceso: 29 3 2017].
- [31] BMBF, „Horizon 2020,“ [Online]. Disponible: <http://www.horizont2020.de>. [Fecha de acceso: 29 3 2017].
- [32] EFRA, „European Factories of the Future Research Association,“ [Online]. Disponible: <http://www.effra.eu>. [Fecha de acceso: 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]. Disponible: <http://www.govdata.org>. [Fecha de acceso: 29 3 2017].
- [35] Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Metrologische IT, Tomo 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, „DIN EN ISO/IEC 17025:2005-08,“ 2005.
- [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]. Disponible: <http://unitsml.nist.gov>. [Fecha de acceso: 29 3 2017].
- [45] TraCIM e.V., „TraCIM Service,“ [Online]. Disponible: <https://tracim.ptb.de/tracim/index.jsf>. [Fecha de acceso: 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]. Disponible: <https://normaldeviate.wordpress.com/2012/06/12/statistics-versus-machine-learning-5-2/>. [Fecha de acceso: 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,“ in Proceedings of the eleventh ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery in data mining, 2005.
- [53] VDE, „VDE-Umfrage: Digitale Transformation bis 2025 abgeschlossen,“ [Online]. Disponible: <https://www.vde.com/de/presse/pressemitteilungen/mitgliedsumfrage-5g>. [Fecha de acceso: 29 3 2017].
- [54] VDE ITG, „Intelligente Mobilfunkantennen, VDE ITG Positionspapier,“ März 2014. [Online]. Disponible: <https://shop.vde.com/de/vde-positionspapier-intelligente-mobilfunkantennen>.
- [55] NIST, „5G & beyond,“ [Online]. Disponible: <https://www.nist.gov/programs-projects/5g-beyond>. [Fecha de acceso: 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, „Zeiss Tastersysteme,“ [Online]. Disponible: https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&resrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKEwiq582_xvVSAhUFRQKHVhvB9YQFggkMAE&url=https%3A%2F%2Ftaster.zeiss.de%2Fforcedownload.php%3Ffile%3Dartifacts%2Fen%2Fartifacts&usq=AFQjCNFaEpwKlFSzZ08RKOoCHnTa6xIsgA&sig2=da_wMy2cWq2epODq05jjNA&bv=bv.150729734,d.d24. [Fecha de acceso: 29 3 2017].
- [58] PTB, „Formmessung gekrümmter optischer Oberflächen,“ [Online]. Disponible: <https://www.ptb.de/cms/nc/ptb/fachabteilungen/abt8/fb-84/ag-842/formmessung-8421.html#c68736>. [Fecha de acceso: 29 3 2017].
- [59] Mahr, „Tilted Wave Interferometer zur schnellen und flexiblen Messung und Analyse asphärischer Linsen,“ [Online]. Disponible: <https://www.mahr.com/de/Leistungen/Fertigungsmesstechnik/Produkte/MarOpto---Messgeraete-fuer-die-Optikindustrie/MarOpto-Tilted-Wave-Interferometer/>. [Fecha de acceso: 29 3 2017].
- [60] PTB, „Tilted-Wave Interferometer,“ [Online]. Disponible: <https://www.ptb.de/cms/de/ptb/fachabteilungen/abt4/fb-42/ag-421/tilted-wave-interferometer.html>. [Fecha de acceso: 29 3 2017].
- [61] Deutsches Forschungsnetzwerk, „Material der 66. Betriebstagung,“ [Online]. Disponible: <https://www.dfn.de/dfn-cloud/weiterentwicklung/workshop-maerz-2017/>. [Fecha de acceso: 31. 3. 2017].

Nota: Las citas utilizadas en el texto fueron traducidas del alemán o inglés al español.