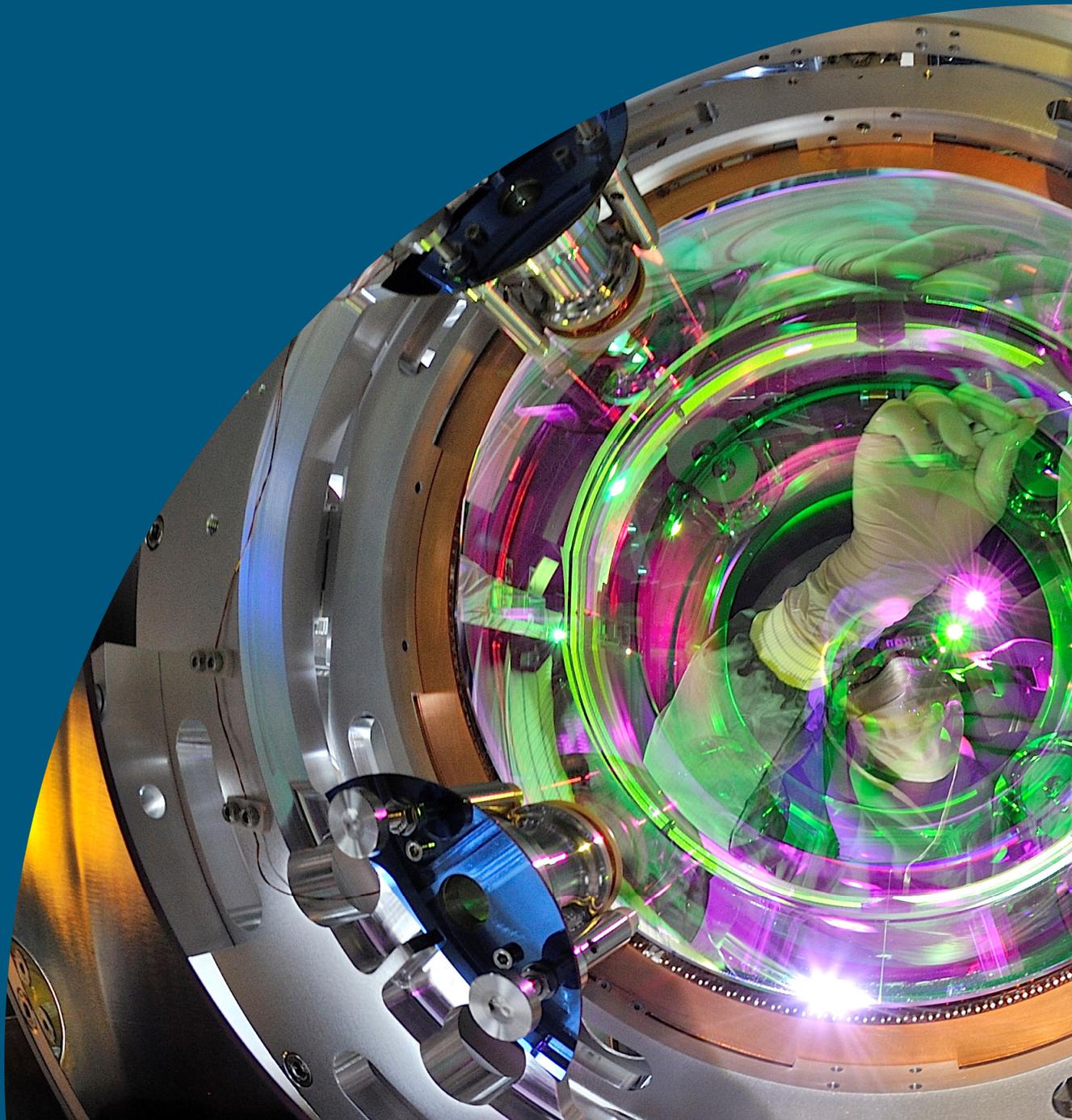


Future Business



# Progressive Mess- und Prüftechnik 2030

Zukunftsbilder für den  
Maschinen- und Anlagenbau | Band 6





Trends und Disruptionen, die für den Maschinen- und Anlagenbau relevant sind, gemeinsam erkennen und nutzen – das hat sich das VDMA Competence Center Future Business auf die Fahnen geschrieben. Denn es ist unsere Industrie, die Trends in Produkte umsetzt.

Wir bieten Trendscouting, Foresight, Startup-Expertise und branchenübergreifende Netzwerke als Dienstleistung für unsere Mitglieder, Industrie und Politik. Wir schaffen Aufmerksamkeit und Öffentlichkeit für die Zukunft des Maschinen- und Anlagenbaus. Wir stärken die maschinenbarelevante Forschung und bauen Wertschöpfungsnetzwerke aus. Ein systematischer „Bottom-up“-Prozess stellt dabei sicher, dass wir die Breite unserer gesamten Industrie berücksichtigen.

Die Heterogenität des Maschinen- und Anlagenbaus und die Vielfalt von Trends und Playern sind eine Herausforderung. Wir bewerten technologische, soziale, ökonomische, ökologische und regulatorische Trends und deren Auswirkungen auf die Geschäftsentwicklung in den kommenden Jahrzehnten – Chancen und Risiken gleichermaßen.

Der VDMA gliedert sich in 38 verschiedene Fachverbände und zahlreiche weitere Fachzweige und Gremien. Seine rund 3.300 Mitglieder machen den VDMA zur größten Netzwerkorganisation des europäischen Maschinenbaus. Rund 500 Experten arbeiten im VDMA. Mehr als 50 von ihnen unterstützen VDMA Future Business mit Ihrer Fach-Expertise in einer eigenen Task Force. Gemeinsam mit Firmen und Forschern erarbeiten wir Zukunftsbilder und Handlungsempfehlungen, um die Wettbewerbsfähigkeit unserer Industrie international zu sichern und auszubauen – unser Beitrag zur Zukunftsgestaltung. 2017 feierte der VDMA sein 125-jähriges Bestehen.

<https://future.vdma.org>



Das Competence Center Foresight im Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI konzipiert, implementiert und begleitet Foresight-Aktivitäten für Auftraggeber aus Wirtschaft, Politik, Wissenschaft und Gesellschaft.

Unser Interesse liegt in der Beantwortung der Frage, wie wir schon heute unser Handeln nach zukünftigen Bedarfen ausrichten können. Zur Erforschung dieser Frage analysieren wir den gesellschaftlichen und technologischen Wandel, entwickeln gemeinsam mit unterschiedlichen Akteuren alternative Zukunftsentwürfe und unterstützen sie im Umgang mit Unsicherheit und bei der Ableitung robuster Zukunftsstrategien.

Die Zukunftsentwürfe des Competence Center Foresight zeichnen sich durch ein methodisch nachvollziehbares, transparentes Vorgehen, die Dokumentation der Annahmen und Wirkungszusammenhänge, die Einbindung der adressierten Akteure sowie Plausibilitäts- und Konsistenzüberprüfung aus. Durch eine aktive Auseinandersetzung mit möglichen, sowie erwünschten zukünftigen Entwicklungen stärken wir die Wissensbasis für strategische Entscheidungen. Unsere Zukunftsentwürfe werden genutzt, um Gestaltungsoptionen auszuloten und robuste Handlungsstrategien zu entwickeln.

Wir verstehen unsere Forschungs- und Beratungstätigkeit als einen Beitrag zur Stärkung der Zukunftsfähigkeit in unserer Gesellschaft und fördern so Lernprozesse und fundierte Diskurse über mögliche Entwicklungen.

<https://www.isi.fraunhofer.de>

Future Business



# Progressive Mess- und Prüftechnik 2030

Zukunftsbilder für den  
Maschinen- und Anlagenbau | Band 6

In Kooperation mit



Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

# Inhalt

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Executive Summary</b>   | <b>3</b>  |
| <b>Die Vermessung der Zukunft</b>  | <b>4</b>  |
| <b>Progressive Messtechnik – Revolution in der Metrologie im 21. Jahrhundert</b>   | <b>5</b>  |
| <b>Zukunftsbilder im Überblick</b>   | <b>7</b>  |
| Zukünfte statt Prognosen   | 7         |
| Maschinenbau und sein Umfeld   | 7         |
| Big Data, Bright Future  | 8         |
| Smart Data, Systematic Future  | 8         |
| Analog Data, Ambivalent Future   | 9         |
| No Future for more Data  | 9         |
| Einflussfaktoren und Annahmen  | 10        |
| Details und Storylines   | 11        |
| <b>Zukunftsbild Big Data, Bright Future</b>  | <b>12</b> |
| Messtechnik ist allgegenwärtig und vollständig vernetzt                            | 12        |
| <b>Zukunftsbild Smart Data, Systematic Future</b>                                  | <b>17</b> |
| Fortgeschrittene Simulationen komprimieren den Messbedarf auf Schlüsselprozesse    | 17        |
| <b>Zukunftsbild Analog Data, Ambivalent Future</b>                                 | <b>21</b> |
| Neue Wirkprinzipien bei stagnierender Digitalisierung                              | 21        |
| <b>Zukunftsbild No Future for More Data</b>  | <b>25</b> |
| Aufbäumen gegen den Fortschritt: keine Standards, kein Austausch, kaum Veränderung | 25        |
| <b>Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen</b>                                | <b>29</b> |
| Handlungsempfehlungen  | 30        |
| <b>Methodik und Beteiligte</b>   | <b>35</b> |
| <b>Anhang</b>  | <b>36</b> |
| Weiterführende Literatur   | 36        |
| Teilnehmer der Workshops   | 41        |

# Executive Summary

Wir leben in einer hochtechnisierten Welt. Mess- und Prüftechnik begegnet uns auf Schritt und Tritt: Ob es um Qualität und Zuverlässigkeit von Alltags-Produkten geht, um die Sicherheit beim Autofahren und Fliegen oder um die medizinische Diagnostik, Landwirtschaft und Ernährung – wir können heute auf alles vertrauen aufgrund von ausgefeilten Geräten und Methoden zur Bestimmung zahlreicher physikalischer Größen. Wir können uns verlassen auf korrekte Justierung und Kalibrierung von Messgeräten sowie einheitliche Standards. Smartphones sind heute mit Sensoren und Messtechnik vollgestopfte Multi-Talente inklusive eingebauter Touch-Panel Bedienoberfläche, Kamera und trainierter künstlicher Intelligenz. Was brauchen wir mehr?

Es ist klar, dass Präzision, Effizienz, Langlebigkeit und Kosten von Mess- und Prüfgeräten mit den stets steigenden Anforderungen der Anwender Schritt halten müssen – dazu gehören auch die Hersteller von Maschinen und Anlagen. Damit ist die Mess- und Prüftechnik Fortschrittsmotor für unsere Industrie. Gibt es Trends und Disruptionen, die sich auf die Fähigkeit, präzise zu Messen auswirken und damit einen Grundstein der Wettbewerbsfähigkeit der Firmen berühren?

Wir versuchen in der vorliegenden Studie, Antworten zu geben und Impulse zu setzen – mithilfe von Zukunftsbildern, die wir in Workshops mit Experten aus Anbieter- und Anwenderindustrien, Forschern und Metrologen erarbeitet haben. Die vorgestellten Szenarien sind keine Prognosen, sondern regen an, Zukunftsannahmen zu variieren und auch zunächst unwahrscheinlich scheinende Alternativen zu Ende zu denken – wer hat vor 2020 die Wucht der Coronavirus-Pandemie vorhergesagt?

Die Studie spannt den Bogen von neuen Technologien über Nachhaltigkeit und soziale Aspekte bis hin zu neuen Geschäftsmodellen. Sie untersucht die Auswirkungen neuer Messprinzipien wie Biosensoren und Quantentechnologie, Miniaturisierung und drahtlose Vernetzung, Simulation und Virtualisierung aber auch Kostendruck,

Verschiebungen von Messtechnikdesign und -Herstellung vom Anbieter zum Kunden und die Rolle und Verfügbarkeit von Fachkräften.

Der Einfluss der Digitalisierung zieht sich als roter Faden durch alle **vier Szenarien** – mit entsprechend prägenden Namen:

**Big Data, Bright Future:** Messtechnik ist allgegenwärtig, kostengünstig und vollständig vernetzt. Weltweite Standards und Datenaustausch sorgen für breiten Einsatz von Sensorik und neue Geschäftsmodelle. Das High-Tech El Dorado lässt Kunden aber zunehmend selbst in Design und sogar Bau von Messtechnik aktiv werden.

**Smart Data, Systematic Future:** Fortgeschrittene Simulationen komprimieren den Messbedarf auf Schlüsselprozesse. Der digitale Zwilling, Virtualisierung, ist ein bestimmendes Merkmal sowohl in der Produktion als auch in der Messtechnik. Als realistisch empfunden, brauchen die Unternehmen Kenntnisse im Umgang mit Daten und Künstlicher Intelligenz und die Fachleute dazu.

**Analog Data, Ambivalent Future:** Neue Wirkprinzipien bei stagnierender Digitalisierung – ein widersprüchlich anmutendes Szenario, das High-Tech in Bio- und Chemiesensoren verknüpft mit der weitgehenden Skepsis gegenüber datenbasierten Verfahren. Anbieter sind stark in ihrem Kerngeschäft, der Produktentwicklung neuer Messsysteme und Mess-Dienstleistungen.

**No Future for more Data?** Aufbäumen gegen den Fortschritt: keine Standards, kein Austausch, kaum Veränderung. Auch in diesem Szenario müssen sich die Unternehmen behaupten können. Es ist äußerst sensitiv gegenüber plötzlich auftretenden „Game Chängern“.

Wir geben in dieser Studie Handlungsempfehlungen für die Unternehmen, Forschung, Politik und Metrologie-Institute. Wir zeigen überdies, wie der VDMA und seine Fachzweige auch in Zukunft die nötige Zusammenarbeit der Player und Best Practices unterstützen wird.

# Die Vermessung der Zukunft



Hartmut Rauen  
Stellvertretender  
Hauptgeschäftsführer  
VDMA



Dr. Eric Maiser  
Leiter  
VDMA Competence Center  
Future Business

Der Roman „Die Vermessung der Welt“ erzählt mit einem Augenzwinkern, wie der abenteuerlustige Entdecker und Universalgelehrte Alexander von Humboldt und das introvertierte Mathematik-Genie Carl Friedrich Gauss Ende des 18. und Anfang des 19. Jahrhunderts mit Messtechnik die Welt veränderten. Neue Messgeräte allein reichten dafür aber nicht aus: Die faktenbasierte Beschreibung und korrekte Interpretation der Daten machten die beiden zu Vordenkern ihrer Zeit. Scharfer Verstand sowohl bei der Beobachtung als auch bei der Aufzeichnung und Verarbeitung zeichnete beide Forscher aus – und sie schufen damit Standards, die bis heute wirken.

Auch heute gilt: „Big Data“ ist noch lange nicht „Smart Data“. Es braucht neben Sensoren und Messprinzipien aus unterschiedlichsten Disziplinen auch Methoden und Technologien, um die Datenflut zu verarbeiten, gepaart mit dem Wissen von Spezialisten, diese zu interpretieren – in Zeiten von hoch komplexen Fragestellungen wie dem Klimawandel oder der Coronavirus-Pandemie und neuen, komplizierten Werkzeugen wie Biosensoren oder Quantenmetrologie ist dies alles andere als trivial. Gleichzeitig werden im Roman auch der Kampf um ausreichende Mittel und die Abwägung und Rechtfertigung von Kosten und (Kunden-)Nutzen thematisiert. Um all das geht es auch in der vorliegenden Studie.

Wir haben uns angeschaut, welche Faktoren die Rolle von Mess- und Prüftechnik im Maschinenbau beeinflussen und das in zweierlei Hinsicht – für Anbieter und Anwender gleichermaßen. Eins ist klar: Messen und Prüfen ist essenziell für unsere Industrie – die sprichwörtliche Präzision, Qualität und Langlebigkeit von Maschinenkomponenten, Maschinen und Anlagen aus Deutschland und Europa ist wesentlich geprägt von der Fähigkeit, Messprinzipien einzusetzen, klug zu kombinieren und zu standardisieren. Fortschritte in diesen Bereichen wirken sich direkt auf unsere Industrie aus – was lag deshalb näher, als sich der „progressiven“ Mess- und Prüftechnik der nächsten Dekade zu widmen?

Die Digitalisierung hat das Messwesen revolutioniert, die Vernetzung und der Umgang mit Daten spielen erwartungsgemäß eine große Rolle. Wir haben in der Studie Virtualisierung, Simulation, neue Regularien und Verschiebungen in der Wertschöpfungskette genauso berücksichtigt wie die Flexibilisierung der Produktion, neue Geschäftsmodelle, Nachhaltigkeit und die Verfügbarkeit von Messtechnik-Spezialisten. In unseren Workshops mit Maschinenbauern, Forschern, Anwendern und der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt als Metrologiebehörde haben wir auch Anwendungen mit spezifischen Herausforderungen aus den Bereichen Chipfertigung, Medizin, Textilien, Agrar- und Recyclingwirtschaft unter die Lupe genommen sowie mögliche Einsatzgebiete neuer Wirkprinzipien und der Hardware-Miniaturisierung betrachtet.

Mit unserem bewährten Partner, dem Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, haben wir aus dem kollektiven Wissen der Workshopteilnehmer Szenarien entwickelt und wollen mit den Ergebnissen unsere Industrie auf möglichen Fortschritt und bevorstehenden Wandel vorbereiten. „Progressive Mess- und Prüftechnik 2030“ ist die sechste Szenariostudie unserer Reihe, „Zukunftsbilder für den Maschinen- und Anlagenbau“.

Fazit: Ohne Mess- und Prüftechnik sind wir blind, faktenbasierte Entscheidungen sind nicht möglich – das gilt für viele Bereiche der Wissenschaft, Ökologie, Gesellschaft, Wirtschaft und Politik und betrifft in besonderem Maße auch den Maschinen- und Anlagenbau. Unsere Projektionen zeigen, dass dies auch in Zukunft so bleibt. Mit den beteiligten Bereichen im VDMA – von Messtechnik und Sensorik bis Digitalisierung und Anwenderindustrien – sind wir sehr gut aufgestellt und vernetzt. Die Studie hat aber auch gezeigt, dass Biologie und Quantentechnologie noch großes Potenzial bieten, entsprechend werden wir diese Themen fachverbandsübergreifend mit unseren Mitgliedern weiterentwickeln. „Die Vermessung der Welt“ ist also noch lange nicht zu Ende.

# Progressive Messtechnik – Revolution in der Metrologie im 21. Jahrhundert



Dr. Daniel  
Hutzschenreuter  
Abteilung 1 (Mechanik und  
Akustik)  
Physikalisch-Technische  
Bundesanstalt  
Braunschweig & Berlin

Die globale Revolution fand am 20. Mai 2019 statt, nachdem sie von langer Hand vorbereitet war. Das Bezugssystem, in dem wir „die Welt vermessen“, bekam an diesem Tag die physikalisch bestmögliche Definition: Naturkonstanten wie die Lichtgeschwindigkeit, die Ladung des Elektrons oder das Planck'sche Wirkungsquantum legen seitdem alle physikalischen Einheiten – von Meter bis Kilogramm, von Ampere bis Kelvin – fest. Damit hat das Internationale Einheitensystem (Système International d'unités, kurz: SI), das von nahezu 100 Staaten der Welt mitgetragen wird, eine grundlegende Auffrischung erfahren, sodass es allen wissenschaftlichen und technischen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts gelassen entgegensehen kann.



Dr. Sascha Eichstädt  
Präsidentialer Stab  
Leitung Koordination  
Digitalisierung  
Physikalisch-Technische  
Bundesanstalt  
Braunschweig & Berlin

Das neue Einheitensystem ist ein Meilenstein der Wissenschaftsgeschichte und, in absehbarer Zeit nach der Neudefinition, auch der Technikgeschichte. Vor dem 20. Mai 2019 hatte man die Einheiten auf unterschiedlichste Weise festgelegt, etwa mit einem Artefakt beim Kilogramm, und bestimmte in diesem Einheitensystem die Werte der Naturkonstanten. So legte eine Definition aus dem Jahre 1889 fest, was ein Kilogramm sein sollte, und auf dieser Grundlage wurden etwa die Masse eines Protons, eines Elektrons oder anderer elementarer Teilchen gemessen. Eine Expertengruppe, nämlich die „CODATA Task Group on Fundamental Constants“ in den USA, hatte (und hat) die Aufgabe, die in den Physiklaboratorien aus aller Welt ermittelten Werte von Naturkonstanten zu bewerten und unter einen Hut zu bringen. Alle vier Jahre bekam so beispielsweise die Ladung des Elektrons einen neuen Zahlenwert – obwohl sich die Ladung real natürlich nicht geändert hatte. Geändert hatte sich lediglich unsere Messkunst und damit unser Wissen über die Welt.



Dr.-Ing. Prof. h. c. Frank  
Härtig  
Vizepräsident Physikalisch-  
Technische Bundesanstalt  
Braunschweig & Berlin

Mit der Revision des Einheitensystems wurde der Spieß nun genau umgedreht. So werden die Einheiten im neuen System nicht mehr gesetzt, sie werden vielmehr – anhand der vorgegebenen Naturkonstanten – ausgerechnet.

Ein Clou am neuen Einheitensystem ist, dass in ihm keinerlei technische Barrieren mehr eingebaut sind. Schwankte etwa im alten System die Masse des Ur-Kilogramms in einer gewissen Größenordnung, so war die beste erreichbare Genauigkeit einer Wägung eben dadurch begrenzt. Im neuen SI dagegen gibt es keine Schwankungen mehr, da die Naturkonstanten ja verbindlich festgelegte Werte bekommen haben. So ist die Kilogramm-Definition unabhängig von möglichen Massedriften jedweder Verkörperungen. Alle elektrischen Einheiten inklusive des Ampere sind als Quantenrealisierungen (über den Josephson- und den Quanten-Hall-Effekt oder „einfach“ durch Zählen von Elektronen pro Zeit) Teil des Systems. Und nicht zuletzt ist das Mol nun auch per Definition über eine festgelegte Anzahl von Teilchen (die Avogadro-Konstante) einer spezifizierten Substanz erfasst. Daher gilt im neuen SI: Kann genauer gemessen werden, können auch die Einheiten genauer realisiert werden – ohne Änderung der zugrundeliegenden Definition.

In einer hochtechnischen Welt, in der weder die Längenteilungen beim Nanometer aufhören werden noch die Zeiteilungen bei Femtosekunden, ist diese technische Offenheit des neuen SI gegenüber allen zukünftigen Genauigkeitsfortschritten ein großer Gewinn. Und diese Offenheit gilt auf der gesamten Skala der jeweiligen Einheit, da die Naturkonstanten keinen speziellen Skalenabschnitt hervorheben.

Noch während das überarbeitete SI seinen Einzug in unsere Welt hält, bahnt sich mit der Digitalisierung unaufhaltsam bereits die nächste Revolution ihren Weg in das 21. Jahrhundert. Sie ist ein fortwährender Prozess, der alle Bereiche der Gesellschaft auf ganz verschiedene Weise intensiv beeinflusst und nachhaltig verändert.

Das Thema Digitalisierung ist vielfach ganz oben auf der Tagesordnung und maßgeblich für viele fundamentale Veränderungen in unserem Alltag



Das neue Kilogramm der PTB: Anstelle der Vergleichswägung mit dem Ur-Kilogramm werden seit dem 20. Mai 2019 nur noch die Atome einer isotopenreinen Silizium-28 Kugel gezählt, um die Masse von einem Kilogramm zu bestimmen.

verantwortlich. In den produzierenden Unternehmen wird insbesondere Digitalisierung im Rahmen von Industrie 4.0, also der vollständig digital vernetzten Produktion, gesehen. Zusätzlich entwickeln die Firmen digital unterstützte Produkte, mit deren Hilfe sie zum Teil auch neue Geschäftsfelder eröffnen. In der Forschung wiederum zeigt sich die Digitalisierung in neuen Forschungszweigen, interdisziplinären Kooperationsprojekten und nicht zuletzt dem Forschungsdatenmanagement.

Viele dieser Aspekte subsumieren sich in einer in Zukunft vollständig digitalisierten Qualitätsinfrastruktur – dem System aus Metrologie, Konformitätsbewertung, Normen & Standards und Marktüberwachung. In dieser werden Prozesse komplett digital abgewickelt, Objekte weitreichend vernetzt und intelligente Algorithmen intensiv genutzt. Diese digitale Transformation ist bereits in vollem Gange und wird durch die aktuellen technologischen Entwicklungen weiter beschleunigt.

Wesentliche gesetzliche Kernaufgaben der PTB sind die Sicherstellung der Einheitlichkeit des Messwesens (Einheiten und Zeitgesetz) und damit verbunden das Vertrauen im Messwesen in einer digitalisierten Welt zu schaffen. So sind die Verpflichtung zur Einhaltung der DIN EN ISO/IEC 17025 sowie die Sicherstellung von Messrichtigkeit, Messbeständigkeit und Prüfbarkeit (MID, Mess- und Eichgesetz) von zentraler Bedeutung. Vor diesem Hintergrund eröffnen sich im Zuge

der Digitalisierung eine Vielzahl neuer Herausforderungen, denen sich die PTB aktiv stellt:

- Sicherung von Vertrauen in Messwerte und Prozesse in digitalen Infrastrukturen;
- Entwicklung geeigneter „digitaler Normale“, wie zum Beispiel Referenzdaten, für die Validierung von Algorithmen;
- (Internationale) Harmonisierung von digitalen Formaten für die Weitergabe metrologischer Informationen, wie zum Beispiel einem „digitalen SI“ und werterhöhenden digitalen Kalibrierschienen für die digital vernetzte Industrie.

Sowohl für die eigene Arbeitsweise als auch für die Prozesse in der Qualitätsinfrastruktur werden neue digitale Technologien entwickelt. Dies umfasst nicht nur die Einführung elektronischer Dokumentenablagen (E-Akte in der PTB), sondern auch zahlreiche fortgeschrittene zentrale IT-Dienstleistungen bis hin zu Cloud-basierten Prozessen im Messwesen (European Metrology Cloud). Dabei nehmen Konzepte wie „security by design“, „privacy by design“ und „Metrology by design“ als unabdingbar für die Sicherung von Vertrauen eine zentrale Position ein.

Eine Schlüsselrolle für den nachhaltigen Erfolg einer global vernetzten Wirtschaft und Industrie im 21. Jahrhundert werden letztendlich ganzheitliche Konzepte für den Umgang mit Messdaten und vernetzten Messgeräten aller Art einnehmen. Fundamentale Veränderungen wie das überarbeitete International Einheitensystem (SI) und die digitale Transformation im Messwesen werden starke Begleiter auf diesem Weg sein.

Dieser Beitrag verwendet Auszüge aus dem PTB-Infoblatt „Das neue International Einheitensystem (SI)“ (Dr. J. Simon, 05/2020) und der PTB-Studie „Metrologie für die Digitalisierung von Wirtschaft und Gesellschaft“ (Dr. S. Eichstädt, 2018).

# Zukunftsbilder im Überblick

## Zukünfte statt Prognosen

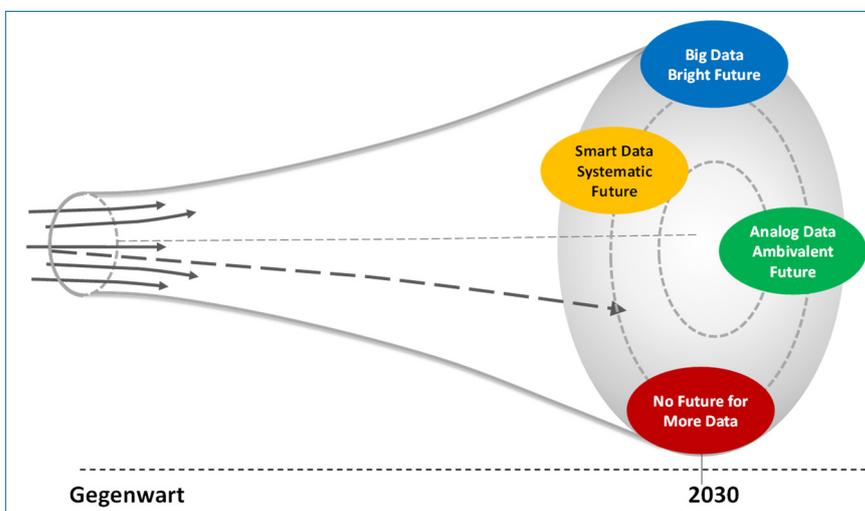
Wie sind wir vorgegangen, um die Entwicklung im Bereich Mess- und Prüftechnik in das Jahr 2030 zu projizieren? Wir haben detailreiche, in sich konsistente, zugespitzte „Zukunftsbilder“ entwickelt. Im Fokus standen dabei Chancen und Herausforderungen für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau als Anbieter und Anwender von Mess- und Prüftechnik, sowie seine Kundenbranchen.

Die hier angewandte Szenario-Methode ermöglicht eine strukturierte Auseinandersetzung mit denkbaren alternativen Entwicklungspfaden. Wir schärfen so das Bewusstsein dafür, dass komplexe Themen keine einfache Unterscheidung zwischen einem Best Case und einem Worst Case erlauben. Szenarien machen Zukunft schon heute erlebbar und ermöglichen ihren Nutzern zukunftsorientiert zu handeln.

In Workshops mit Vertretern aus Unternehmen und Forschung wurden Einflussfaktoren ermittelt, priorisiert und alternative Ausprägungen für 2030 diskutiert. Diese bildeten die Grundlage für maschinenbauspezifische Szenarien.

Die Szenarien werden unten mithilfe eines Zukunftstrichters dargestellt. Dieser verdeutlicht, dass die Unsicherheit der Entwicklungen zunimmt, je weiter in die Zukunft geschaut wird. Wichtig dabei ist: Szenarien sind niemals Prognosen, durch sie werden unterschiedliche Möglichkeiten beleuchtet. Sie fördern das Verständnis dafür, was auf uns zukommen kann. Auf dieser Basis können Handlungsoptionen sehr konkret diskutiert werden – als erste Entscheidungsbasis für die Unternehmensstrategie.

Die vier hier vorgestellten Zukunftsbilder „Progressive Mess- und Prüftechnik“ sind keine simple Fortschreibung der aktuellen Entwicklungen. Es finden relevante Veränderungen gegenüber heute statt, die sich jeweils aus dem Zusammenwirken der Einflussfaktoren ergeben. Wir fassen im Folgenden zunächst die charakteristischen Züge der Zukunftsbilder zusammen, stellen zugrundeliegende Einflussfaktoren und deren Ausprägungen tabellarisch dar, beschreiben die Zukunftsbilder danach im Detail und geben abschließend Handlungsempfehlungen. Die weiterführende Literatur im Anhang erlaubt einen tieferen Einstieg in das Thema.



Zukunftstrichter: Schnittfläche im Jahr 2030 mit möglichen konsistenten Zukünften. Unterschiedliche Ausprägungen von Einflussfaktoren haben Auswirkungen auf die Zukunft. Je weiter die Szenarien im Jahr 2030 vom Mittelpunkt entfernt sind, desto grundlegender sind die Veränderungen – im Positiven oder im Negativen. Quelle: Fraunhofer ISI und VDMA

## Maschinenbau und sein Umfeld

Der deutsche Maschinen- und Anlagenbau entwickelt und produziert Lösungen für die zentralen Herausforderungen unserer Zeit mit einer Exportquote von über 75 Prozent. Mit einem Anteil von rund 10 Prozent an den Forschungs- und Entwicklungsaufwendungen der Gesamtwirtschaft zählt er zu den forschungsstärksten Industriezweigen Deutschlands.

Mess- und Prüftechnik ist eines der übergreifenden Fachgebiete, das nicht nur in alle Bereiche des Maschinenbaus wirkt, sondern auch in alle anderen Industriezweige, in Forschung, Wissenschaft und die Gesellschaft. Die Produktion der Anbieter erreichte 2019 allein in den Teilbranchen Längenmesstechnik, Prüftechnik und Wägetechnik zusammen 6,7 Mrd. Euro.



## Big Data, Bright Future ●

### Messtechnik ist allgegenwärtig und vollständig vernetzt

Die Digitalisierung der Industrie hat sich voll und ganz durchgesetzt und ist globaler Standard. Zur integrierten Optimierung und Automatisierung einzelner Prozessschritte kommt Mess- und Prüftechnik in nahezu allen Branchen umfangreich zum Einsatz.

Hierbei wird in erster Linie auf die Auswertung von großen Datenmengen mit Hilfe fortschrittlicher Anwendungen aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz gesetzt. Die Bereitstellung der dafür nötigen Messdaten erfolgt zusätzlich zu den klassischen Messsystemen mit Hilfe von drahtlos vernetzten Low Cost Sensoren, deren geringe Genauigkeit über ihre hohe Verteiltheit und die Fusion der Messergebnisse ausgeglichen wird. Die notwendige Rechenleistung, um mit der resultierenden Datenflut umgehen zu können, wird u.a. durch kommerziell einsatzfähige Quantentechnologie und –metrologie erreicht.

Nicht nur innerhalb einzelner Unternehmen, sondern auch zwischen den Akteuren spielt der Austausch von Daten eine immer größere Rolle. Von zentraler Bedeutung ist dabei die gelungene Etablierung weltweiter Standards – sowohl im Bereich der SI-Einheiten als auch bezüglich digitaler Formate. Das ermöglicht einen florierenden Datenhandel und auch die Einbindung von kleineren Firmen, die bisher, durch parallel existierende Standards größerer Player, auf der Strecke geblieben sind.

Der Mehrwert, der durch den Handel mit Messdaten entsteht und die Integration der Messungen innerhalb der Prozesse führen dazu, dass Messtechnik in aller Regel durch den Anwender selbst und nur in Sonderfällen durch externe Anbieter designt wird. Eine der größten Herausforderungen liegt in der Gewährleistung von Datensicherheit und –verlässlichkeit.



## Smart Data, Systematic Future ●

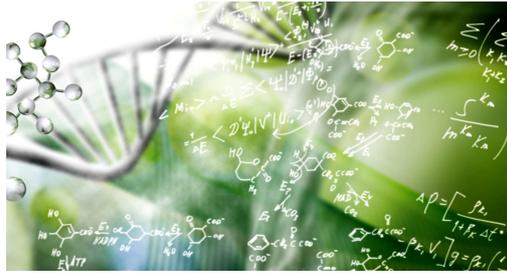
### Fortgeschrittene Simulationen komprimieren den Messbedarf auf Schlüsselprozesse

Die Möglichkeiten digitaler Anwendungen in der Mess- und Prüftechnik haben die klassischen Verfahren weitestgehend abgelöst. Die vollständige Vernetzung von Prozessen und der Zugang zu umfangreichem Datenmaterial hat zur Optimierung von Simulationsprozessen beigetragen. Ausgefeilte Modelle und optimierte Prozessfenster reduzieren den Bedarf an tatsächlichen Messungen auf ein Minimum, sodass Messtechnik-Anbieter sich auf die Verifikation von Simulationen und auf Spezialfälle konzentrieren.

Der digitale Zwilling, die virtuelle Abbildung von Hardware, ist ein bestimmendes Merkmal sowohl in der Produktion als auch in der Messtechnik. Das entsprechende Know-how ist damit untrennbar verbunden, sodass Messtechnik beim Kunden „Downstream“ beherrscht wird.

Hierfür bieten hochwertige, aber günstige Baukastensensoren nach dem „Components-off-the-shelf“-Prinzip die notwendige Flexibilität. Statt der Entwicklung neuer Wirkprinzipien, ist für die Funktionalität solcher Commodity-Sensoren in erster Linie die Elektronik- und Softwareebene relevant. Dabei eröffnet die breite Nutzung von Quantenmetrologie neue Möglichkeiten, was nicht zuletzt durch die Lösung von bis dato analytisch unlösbaren Problemen zum Siegeszug der Simulationsansätze beigetragen hat.

Ebenfalls von großer Bedeutung ist die Festlegung auf international geltende Standards, auf die man sich nach einem langwierigen Prozess einigen konnte. Nach anfänglichen Schwierigkeiten bei der Datensicherheit, gelten die Prozesse, durch die Nutzung standardisierter Open Source Software, als ausreichend geschützt. Das liegt u.a. daran, dass durch die Simulation „vor Ort“ nur noch an Schlüsselstellen tatsächlich ein Austausch von Messdaten stattfinden muss.



## Analog Data, Ambivalent Future ●

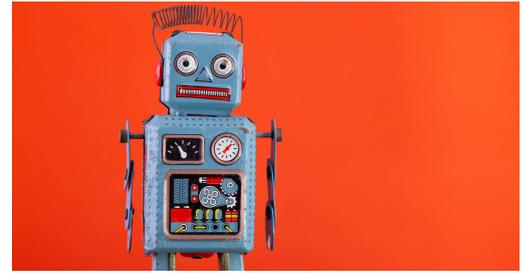
### Neue Wirkprinzipien bei stagnierender Digitalisierung

Nach anfänglicher Euphorie ist die umfassende Digitalisierung der Industrie schlussendlich im Sand verlaufen. Geopolitische Spannungen und hohe Kosten haben dazu geführt, dass die Vernetzung von Prozessen und Akteuren Attraktivität verloren hat. Stattdessen haben Sicherheit und Verlässlichkeit höchste Priorität. Die „klassische“ Messtechnik genießt hohes Ansehen.

Neuerungen innerhalb der Mess- und Prüftechnik finden sich insbesondere in der Anwendung neuer Wirkprinzipien, z.B. durch innovative bio- und chemiebasierte Sensoren. Simulationen und andere datenintensive Verfahren hingegen haben sich nur bedingt weiterentwickelt und bleiben in erster Linie für klar abgegrenzte Nischenanwendungen relevant. Auch die Quantenmetrologie hat es bisher nicht in die kommerzielle Anwendung geschafft, sondern bleibt zunächst nur für die Wissenschaft ein Thema.

Neben einer gewissen Skepsis gegenüber Veränderungen von Seiten der Anwender, ist es prägend, dass Daten als Schlüssel für den Wettbewerbsvorsprung gelten und deshalb kein Austausch zwischen unterschiedlichen Akteuren stattfindet. State-of-the-Art sind hoch genaue, spezifische und meist teure Sensoren, die zum Teil „analog“ über das Stromkabel miteinander verbunden sind, was eine weniger umfangreiche aber dafür besonders sichere Art von Edge-Computing erlaubt. Design, Herstellung und Know-How der Messtechnik wird stets „Upstream“, durch Messtechnik-Anbieter geleistet.

Im Bereich der Standardisierung konnten sich die politischen Akteure auf keine offiziellen globalen Regelungen einigen. Aus wirtschaftlichen Gründen haben sich jedoch de facto Standards etabliert, die von einzelnen, besonders einflussreichen Playern getrieben sind.



## No Future for more Data ●

### Aufbäumen gegen den Fortschritt: keine Standards, kein Austausch, kaum Veränderung

Die Mess- und Prüftechnik ist geprägt von dem Versuch, an bewährten Konzepten festzuhalten und durch Isolation Neuerungen auszubremsen, die in einigen Bereichen von Newcomern vorangetrieben werden.

Es bestehen vereinzelt Innovationen bezüglich neuartiger Wirkprinzipien bei Sensoren, Simulationmöglichkeiten, KI-basierten Auswertungsalgorithmen oder Quantenmetrologie. Etablierte Anbieter von Messtechnik befürchten durch diese Neuerungen jedoch eine Verlagerung des Messprozessdesigns „Downstream“ zum Kunden und unterstützen diese Entwicklung nicht, um an ihren bewährten Geschäftsmodellen festhalten zu können.

Das macht sich u.a. durch mangelnde Standardisierung bemerkbar. Die einflussreichsten Anbieter versuchen ihre Stellung zu sichern und eigene Standards durchzusetzen. Sie nehmen dabei die Unzufriedenheit der Anwender in Kauf, die die untereinander nicht kompatiblen Formate und Schnittstellen z.T. überfordern.

Diese Taktik geht zunächst auf, da neuartige Prozesse noch nicht ausgereift sind. Zudem herrscht auch unter den Kunden Skepsis gegenüber technischen Neuerungen und insbesondere KI-basierten Verfahren. Nicht zuletzt deshalb häufen sich Gesetzen und Regularien, was Entwicklungspotenziale noch weiter eingeschränkt.

Die Digitalisierung und Vernetzung von Prozessen ist daher kaum vorangeschritten. Jedoch werden diese Möglichkeiten wirtschaftlich immer interessanter, sodass Veränderungen absehbar scheinen. Beispielsweise wird versucht, mithilfe von KI den Fachkräftemangel auszugleichen, was jedoch u.a. die Kluft zwischen Fertigung und Ingenieuren weiter vertieft.



Szenario und Szenariofarbe

Big Data (blau) Smart Data (gelb) Analog Data (grün) No Data (rot)

| Einflussfaktor  | Annahme A  | Annahme B   | Annahme C  | Annahme D            |
|---|--|---|--|----------------------|
| <b>Digitalisierung</b>  | Digitalisierung hat sich durchgesetzt                                  | Digitalisierung stagniert   |  |                      |
| <b>Verfügbarkeit von Fachkräften</b>                                  | Künstliche Intelligenz (KI) ersetzt Fachkräfte                         | Hohe Verfügbarkeit durch hohe Attraktivität der Aus- und Weiterbildung  | Kompetenz bei Maschinenbauer und Messtechnik-Anbieter                        |                      |
| <b>Modellierung und Simulation</b>                                    | Simulation ist unvollständig und benötigt weiterhin Messtechnik        | Simulation vermehrt in Nischenanwendungen                               | Simulation in der breiten Anwendung ersetzt Messtechnik                      |                      |
| <b>Neue Wirkprinzipien<sup>1</sup> und Miniaturisierung</b>           | Ubiquitous Sensing   | Neue Wirkprinzipien führen zu Weiterentwicklung der Prozesstechnik      | Commodity Sensoren, „Handy misst alles“                                      |                      |
| <b>Kostendruck</b>  | Low Cost Sensorik in der Industrie                                     | High-tech, high value Sensor  | High-tech, low cost  |                      |
| <b>Standardisierung</b>   | Anwendung weltweit einheitlicher Standards                             | De facto Standards setzen sich durch                                    | Kein einheitlicher Standard  |                      |
| <b>Messtechnik für besondere Anwendungsfelder</b>                     | Kontinuierliche Messtechnik führt zur Vollautomatisierung              | Technikfeindlichkeit  | Größere Prozessfenster benötigen weniger genaue Messtechnik                  |                      |
| <b>Ökologie und Nachhaltigkeit</b>                                    | Messtechnik ermöglicht nachhaltiges Wirtschaften                       | Jeder für sich  | Messtechnik weitgehend unbeeinflusst   |                      |
| <b>Gesetze und Regularien<sup>2</sup></b>                             | Synthese zwischen Gesetzgebung und Privatwirtschaft                    | Alles wie gehabt  | Smart Data und Smart Law   | Überregulierung      |
| <b>Verschiebung der Messtechnik innerhalb der Wertschöpfungskette</b> | Messtechnik-Anwender machen Messtechnik selbst                         | Messtechnik-Anbieter wird benötigt                                      | Messtechnik-Anbieter wird nur noch für Spezialfälle benötigt                 |                      |
| <b>Quantenmetrologie der zweiten Generation<sup>3</sup></b>           | Kommerzielle und breite Nutzung von Quantenmetrologie etabliert        | Kein Einsatz von Quantenmetrologie                                      | Einsatz von Quantenmetrologie nur im High-End Bereich                        |                      |
| <b>Drahtlose Vernetzung von Sensoren und Messsystem</b>               | Vollständige drahtlose Vernetzung                                      | Vernetzung über Kabel   | Keine Vernetzung   |                      |
| <b>Datenhoheit und Bereitschaft zum Teilen von Daten</b>              | Florierender Datenhandel   | Messdaten werden nicht geteilt  | „Datensparsamkeit“   |                      |
| <b>Datensicherheit</b>  | Weitgehende Cyber-Security durch ganzheitliche IT-Optimierung          | Weitgehende Cyber-Security, u.a. durch Nutzung von Open Source Software | Vernachlässigte Cyber-Security: Fehlendes Bewusstsein, keine Differenzierung |                      |
| <b>Automatisierung und Flexibilisierung der Produktion</b>            | Vollständige Automatisierung und bestmögliche Effizienz bei Losgröße 1 | Kaum Verknüpfung, kaum Flexibilität                                     | Automatisierung bei Mess- und Datensparsamkeit                               | Nur in Spezialfällen |

Tabelle der priorisierten Einflussfaktoren mit unterschiedlichen Ausprägungen von Annahmen im Jahr 2030. Die Szenarien ergeben sich durch die Verknüpfung von jeweils konsistenten Annahmen für jeden einzelnen Faktor, kenntlich gemacht durch farbige Punkte und Fäden. Quelle: Fraunhofer ISI und VDMA

<sup>1</sup> Neue Wirkprinzipien: Mikroelektronik in Verbindung mit Software haben in den letzten 10 Jahren einen großen Baukasten von neuen Messtechniken ermöglicht. Smartphones haben einen Massenmarkt für Sensoren geschaffen, von Gyro- und Magnetfeldsensoren bis zu hochauflösenden miniaturisierten Kameras oder Touch-Screens. Die Mikrointegration hat Messtechnik billiger, kleiner, verfügbarer gemacht. Die organische und gedruckte Elektronik ermöglicht schon heute low-cost Sensoranwendungen zur Überwachung von u.a. Temperatur, Gas, Druck. Biobasierte, chemische, nicht-invasive Messtechnik ist allerdings noch nicht etabliert. Inline Messtechnik hat noch großes Potenzial. Dies wird hier adressiert.

<sup>2</sup> Gesetze und Regularien jenseits der Messtechnik wurden bewusst ausgelassen, obwohl diese mittelbar die Branche betreffen können. Sie sind stark abzugrenzen von Standards. Diese werden von der Branche erarbeitet oder ergeben sich als de-facto-Standards, d.h. nicht (nur) durch die Politik.

<sup>3</sup> Laser, Mikro- und Nanoelektronik, Supraleiter, Magnet- und Kryotechnik – Quantentechnologien (QT) sind heute schon vielfach im Einsatz. Laser und Transistor werden als „QT der

## Einflussfaktoren und Annahmen

Unser Szenarioprozess bezieht Unternehmen des Maschinenbaus, Kundenbranchen und Forschungsorganisationen in zwei Workshops ein. Bei dieser Studie waren auch Vertreter des nationalen Metrologieinstituts PTB aktiv. Im ersten Workshop erarbeiteten die Teilnehmer in einem Brainstorming fast 50 Einflussfaktoren, die sich in die Bereiche gesellschaftliche Faktoren, ökologische, ökonomische, technologische und regulative Rahmenbedingungen strukturieren ließen. Mit einem Rankingverfahren wurden aus diesem umfassenden Fundus zunächst zwölf Faktoren priorisiert und dabei insbesondere auf die Relevanz für den Maschinenbau als Kriterium geachtet. Die Zerlegung der Gesamtfrage „Wie wird die Branche im Jahr 2030 aussehen“ in einzelne Faktoren ermöglicht es, viel leichter zu diskutieren: Für jeden Einzelfaktor wird dabei die Situation heute und denkbare Ausprägungen in der Zukunft beschrieben. Wir haben diese zugespitzt formuliert, um die Unterschiede klar darzustellen und auch zunächst unwahrscheinlich scheinende Annahmen zu Ende zu denken. Die einzelnen Zukunftsannahmen wurden danach softwareunterstützt zu konsistenten, widerspruchsfreien Kombinationen zusammengefasst<sup>4</sup>. Im Laufe der Konsistenzanalyse ergaben sich drei zusätzliche Faktoren.

ersten Generation“ gesehen, die eine große Anzahl von Quantenobjekten beeinflussen. QT der zweiten Generation nutzen Quanteneffekte nicht mehr nur kollektiv, sondern kontrollieren sie gezielt. Dazu kann man kommerziell erhältliche Geräte wie Atomuhren oder Kernspintomographen zählen. QT der zweiten Generation kann z. B. sehr viel genauere Sensoren und Messgeräte ermöglichen, die Schnelligkeit und Sicherheit bei der Datenkommunikation stark verbessern oder deutlich leistungsfähigere Computer hervorbringen. Die Möglichkeiten dieser Technologien sind so groß, dass sie erhebliche Auswirkungen auf die Wirtschaft und Gesellschaft haben können. Wir haben uns in dieser Studie auf die Quantenmetrologie und -kryptographie der zweiten Generation konzentriert.

<sup>4</sup> Die Einflussfaktoren und Annahmen, aus denen die Szenarien gebildet werden, können grundsätzlich auch anders kombiniert werden. Besonders bei dem sehr heterogenen Feld der Mess- und Prüftechnik keine leichte Aufgabe. Wir haben uns im Dialog für diese vier Kombinationen entschieden, weil sie größtmögliche Konsistenz und eine überschaubare Zahl von Szenarien ergaben.

Die Tabelle links fasst zusammen, welche Einflussfaktoren und Annahmen ausgewählt und diskutiert wurden. Die Annahmen-Kombinationen sind dargestellt durch unterschiedlich farbige Punkte und Fäden. Sie waren der Ausgangspunkt für die Zukunftsbilder, die dann in einem weiteren Workshop evaluiert und ausgearbeitet wurden.

Die vier Zukunftsbilder zeigen die Bandbreite, in der sich der Fortschritt für Mess- und Prüftechnik bis 2030 darstellen könnte. Ziel war es nicht, die gesamte Komplexität des Themas in allen Facetten abzubilden, sondern pointiert auf solche Aspekte einzugehen, die den breiten Einfluss auf die Hersteller von Mess- und Prüftechnik, den Maschinen- und Anlagenbau (Anbieter von Messtechnik und verbauten Systemen) und seinen Kunden (Anwender von Messtechnik) erkennen lassen. Hersteller von Messtechnik und Anbieter von Mess-Dienstleistungen sind dabei nicht immer derselbe Player. Neue Geschäftsmodelle wie „Metrology-as-a-service“ bringen neue Akteure hervor, die wir für alle Zukunftsbilder mit diskutiert haben.

Bei der Auswahl der Annahmen zeigte sich, dass für jeden Faktor unterschiedliche Impulsgeber oder Know-How-Träger aus den „Lagern“ der Anbieter und der Anwender existieren. Im Format der Studie war sowohl dies als auch die „Situation heute“ nicht übersichtlich darstellbar. Wir stellen diese Informationen kompakt separat als Downloads zur Verfügung:

- Übersicht der Szenarien im Fadendiagramm [Download](#)
- Inhalte der Übersicht ausführlicher:  
Die 15 Einflussfaktoren mit Situation heute und unterschiedlichen Zukunftsannahmen auf einen Blick, mit Treibern, Impulsgebern und Know-How-Trägern [Download](#)

Wir haben die Zukunftsbilder zwar mit Blick auf die große Exportquote des Maschinen- und Anlagenbaus und den breiten Einsatz von Mess- und Prüftechnik weltweit sowie die Notwendigkeit von internationaler Zusammenarbeit und Standards diskutiert, aber nicht wesentlich regional unterschieden. Die einzelnen Szenarien könnten nebeneinander in unterschiedlichen Regionen der Welt relevant werden. Auch vor diesem Hintergrund ist es wichtig, breite Annahmen zu treffen.

## Details und Storylines

Auf den folgenden Seiten werden die Zukunftsbilder im Detail vorgestellt. Sie sind jeweils aus der Sicht des Jahres 2030 formuliert. Die Einflussfaktoren aus der oben genannten Tabelle dienen dabei der Strukturierung der Kapitel.

Im zweiten Workshop wurden überdies „Storylines“ für ausgewählte Unternehmens- bzw. Anwendergruppen erarbeitet, die wir im Folgenden als „Newsfeeds“ des VDMA im Jahr 2030 aufbereitet haben. Leitfragen im Workshop waren dabei:

- Welches Szenario hat die größte Relevanz für die spezifische Unternehmensgruppe?
- Mit welchen Potenzialen für Maschinenbauunternehmen geht dieses Szenario einher?
- Wie würden Unternehmen unter diesen Rahmenbedingungen reagieren?
- Wie verändern sich Produkte, Prozesse und Wertschöpfungsketten?
- Wie wird sich der Arbeitsalltag im Vergleich zu heute ändern? Wie verändern sich Berufsbilder? Welche Kompetenzen werden benötigt?
- Wie sieht die internationale Arbeitsteilung aus?

# Zukunftsbild

## Big Data, Bright Future



### Messtechnik ist allgegenwärtig und vollständig vernetzt

Im Zukunftsbild „Big Data, Bright Future“ wurde die Industrie umfangreich und international digitalisiert und Datenströme sind eng miteinander vernetzt. KI und Quantentechnologie bieten erhebliches Potenzial zur Automatisierung und Optimierung von Prozessen und Messtechnik ist hierfür ein zentraler Bestandteil – Simulationen spielen im Vergleich zum tatsächlichen Messen eine untergeordnete Rolle.

Internationale Standards erlauben die Kompatibilität mit digitalen Formaten und ermöglichen so einen florierenden Datenhandel. Die Bereitstellung der Daten erfolgt neben vernetzten klassischen und High-Tech-Sensoren zunehmend auch durch zahlreiche, in die Prozesse integrierte Low-Cost-Sensoren, die durch hohe Verteiltheit und Datenfusion kostengünstigen und genauen Output liefern.

Große, gemeinsam genutzte Datenpools sind entstanden, insbesondere auch, um KI zu trainieren und zu validieren. In dieser vernetzten, datenbasierten Zukunft bestehen insbesondere Sensibilitäten und Herausforderungen bei der Gewährleistung von Datensicherheit, Datensouveränität und Datenzuverlässigkeit. Diese sind gemeistert worden.

### Faktor Digitalisierung: Digitalisierung hat sich durchgesetzt

Die Digitalisierung der Industrie ist globaler Standard. Prozesse sind vollständig miteinander vernetzt und es existiert ein voll digitalisiertes, vereinheitlichtes SI-System. Durch den digitalen Kalibrierschein ist der Prozess der Kalibrierung und Rückführung<sup>1</sup> deutlich vereinfacht und es entsteht zusätzliches Wertschöpfungspotenzial.

<sup>1</sup> Im Bereich der industriellen Messtechnik wird kaum geeicht, in anderen Bereichen wie der Medizintechnik schon. Eichen ist ein Vorgang zur gesetzlich vorgeschriebenen Prüfung eines

Die Vereinheitlichung erlaubt es auch kleineren Unternehmen gewinnbringend teilzunehmen, wodurch die Vernetzbarkeit und Reichweite der Messdaten zusätzlich erhöht wird.

### Faktor Verfügbarkeit von Fachkräften: KI ersetzt Fachkräfte

Die Digitalisierung und der Einsatz von fortschrittlicher KI übernehmen zunehmend Aufgaben, für die sonst Facharbeiter benötigt worden sind. Das mindert zum einen den Fachkräftemangel, vertieft zum anderen jedoch die Kluft zwischen den verbleibenden Hilfskräften im Shop Floor und den hochqualifizierten Ingenieuren, die in allen Branchen stark umworben werden. Die Weiterbildung von geringer qualifizierten Kräften oder Mitarbeitern ohne Erfahrung im Umgang mit KI und digitalen Formaten ist teilweise schwierig.

### Faktor Modellierung und Simulation: Simulation ist unvollständig und benötigt weiterhin Messtechnik

Zwar gibt es Neuerungen im Bereich der Simulationen, jedoch steigt mit zunehmenden Möglichkeiten auch die Komplexität der Systeme, sodass deren Simulation nach wie vor unvollständig ist und gegenüber dem Mehrwert der tatsächlichen Messungen nur in bestimmten Bereichen Mehrwert schafft. Das liegt nicht zuletzt daran, dass der Rechenaufwand für ausreichend genaue Simulationen zu hoch ist. Zweckgebundene Modellierungen (z.B. mechanisch/chemisch) tragen jedoch dazu bei, die Datenflut verteilter Sensoren in den Griff zu bekommen.

Messgerätes. Er beinhaltet häufig eine Kalibrierung. In der industriellen Messtechnik ist eine Kalibrierung, die zumeist einen Rückführungsnachweis beinhaltet, meistens ausreichend.

---

**VDMA-Newsfeed 2030**
**Messtechnik zum Aufsprühen**

**Das Münchener Startup-Unternehmen „Spray and Proof“ bringt drahtlos vernetzte Sprühsensoren auf den Markt. Diese sogenannten Messschichten können auf nahezu jede Oberfläche appliziert werden und übermitteln gesammelte Daten ans Handy.**

Die beiden von der VDMA Startup Machine geförderten Entwickler aus Oberbayern haben nach dreijähriger Entwicklung ihr „Sensorsystem zum Aufsprühen“ in den Einzelhandel gebracht. Durch das patentierte Verfahren ist es erstmals möglich, chemisch-biologische Sensoren über ein Sprühverfahren aufzutragen. Diese sowohl transparent als auch in unterschiedlichen Farben erhältliche Schichten können unterschiedliche Größen wie Temperatur, CO<sub>2</sub>-Gehalt oder Sonneneinstrahlung messen und diese Werte orts aufgelöst z.B. an Mobiltelefone senden.

---

**Faktor Neue Wirkprinzipien und Miniaturisierung: Ubiquitous Sensing**

Messtechnik ist für die Vernetzung und Optimierung von Prozessen unverzichtbar. Es wurden kostengünstige neue Sensortypen für ein breites Spektrum von Messgrößen entwickelt, die ubiquitär, d.h. allgegenwärtig eingesetzt werden können. Durch die extrem hohe Verteiltheit, neuartige Wirkmechanismen und Auswertungstechniken, können Zustände, Bedingungen und Prozesse in vielen Anwendungen praktisch lückenlos gemessen werden. Es entstehen so auch völlig neue Anwendungsmöglichkeiten<sup>1</sup>.

**Faktor Kostendruck: Low Cost Sensorik in der Industrie**

Durch die hohe Bedeutung und Nachfrage von Messtechnik steigt der Bedarf an massenhaft verfügbaren Sensoren. Es werden extrem günstige, überall einsetzbare Sensoren entwickelt und in hohen Stückzahlen hergestellt<sup>2</sup>. Diese sind zwar im Vergleich zu High-Tech-Sensoren relativ ungenau, können durch den geringen Preis aber praktisch flächendeckend eingesetzt („Ubiquitous Sensing“) und z.T. in bestehende

<sup>1</sup> Mit Hilfe von hoch verteilten, gedruckten Temperatursensoren in Fußböden könnten beispielsweise exakte Raumbelastung oder Bewegungsprofile von Menschen gemessen werden.

<sup>2</sup> Die organische und gedruckte Elektronik ermöglicht bereits heute die kostengünstige Herstellung von Sensoren, die zur Messung verschiedenster Umgebungsparameter eingesetzt werden. Durch gezielte Kombination von Sensoren mit gedruckten Schaltungen sowie gedruckten Solarzellen, Batterien oder „Energy Harvesting“ können zudem energieautarke Systeme realisiert werden. Der Einsatz von z.B. Rolle-zu-Rolle Verfahren ermöglicht dabei auch großflächige Sensoranwendungen bei niedrigen Herstellungskosten.

Messsysteme integriert werden. Durch Sensorfusion und -statistik können Messungenauigkeiten ausgeglichen und Prozesse verbessert werden. Die Optimierung von Prozessfenstern und Messgenauigkeit geht dabei Hand in Hand.

**Faktor Standardisierung: Anwendung weltweit einheitlicher Standards**

Nach langwierigen Verhandlungs- und Standardisierungsprozessen konnten weltweit geltende Regelungen etabliert werden. Einheitliche Standards zu Messvorschriften und Kommunikation erlauben vollständig kompatible Prozesse nach dem Motto „Plug & Proof“. Zudem herrscht eine stabile Datenlage, d.h. „alle“, insbesondere auch alte Daten sind verfügbar.

**Faktor Messtechnik für besondere Anwendungsfelder: Kontinuierliche Messtechnik führt zur Vollautomatisierung**

Beispiel Abfall- und Recyclingtechnik<sup>3</sup>: Progressive Messtechnik erlaubt die Rückführung von Material im Sinne der Kreislaufwirtschaft. Es kann eine praktisch vollautomatisierte Rohstoffklassifikation und Materialtrennung erreicht werden. Zudem erlaubt die flächendeckende Messung innerhalb der Prozesse eine optimierte Rohstoffausbeute durch Messtechnik zur Überwachung der Rohstoffqualität.

<sup>3</sup> Für die Messtechnik gibt es einige Spezialfälle mit spezifischen Anforderungen, die durch die alleinige Betrachtung von Produktionsumgebungen als Anwendung nicht abgedeckt werden. Dazu zählen Medizintechnik, Landwirtschaft, Bau, Chipfertigung oder die Recyclingwirtschaft. In den Workshops haben wir uns auf letzteres konzentriert, weil dort geringer Automatisierungsgrad und Logistik herausfordernd sind. Spezifisch für die Medizintechnik sind u.a. Hygiene, Mehrfachmessungen wegen fehlendem Datenaustausch, bei der Chipfertigung Reinraumtauglichkeit, extreme Präzision und das Ausloten von messtechnischen Grenzen.

### **Faktor Ökologie und Nachhaltigkeit: Messtechnik ermöglicht nachhaltiges Wirtschaften**

Nicht zuletzt durch Effizienzsteigerungen und der Ermöglichung von Rohstoffklassifizierung und –rückführbarkeit, trägt Messtechnik maßgeblich zur Gewährleistung von nachhaltigem Wirtschaften bei. Messtechnik unterstützt hierbei auch die Entwicklung einheitlicher Standards zur Umsetzung ökologischer Ziele und ermöglicht Bewertbarkeit und Transparenz bei deren Realisierung.

### **Faktor Gesetze und Regularien: Synthese zwischen Gesetzgebung und Privatwirtschaft**

Bei der Gesetzgebung ist es gelungen, eine gute Balance zu finden. Das bedeutet, es existieren ausreichend Regelungen, um die Zusammenarbeit in der Branche zu gewährleisten und gleichzeitig bleibt genug Freiheit, um den technischen Fortschritt nicht zu behindern. Unter anderem konnte das erreicht werden, indem Potenziale aus dem privaten Bereich genutzt, und Standardisierung und Kalibrierprozesse an den Entwicklungen in der Industrie ausgerichtet wurden. Sofern Produkte geeicht werden müssen, werden diese Prozesse auch von privatwirtschaftlichen Unternehmen durchgeführt, was teilweise effizientere und kurzfristigere Prozesse ermöglicht, als dies bei staatlichen Institutionen der Fall ist.

<sup>1</sup> Die Mehrzahl der industriellen Anwender messen selbst. Es gibt auch zahlreiche Dienstleister, meistens für Spezialaufgaben, Analysen und Kleinserien. Im Bereich der Kalibrierung der Messsysteme dominieren die Dienstleister. Anders sieht es beim Design des Messprozesses aus. Hier setzen Kunden heute häufig auf die vordefinierten Systeme der Anbieter. Das ändert sich hier fundamental: Mit den vermehrt verfügbaren, billigen, vernetzbaren Komponenten und Know-How-Aufbau kommen die Kunden selbst in die Lage, Messtechnik selbst herzustellen und nicht nur anzuwenden.

### **Faktor Verschiebung der Messtechnik innerhalb der Wertschöpfungskette: Messtechnik-Anwender machen Messtechnik selbst**

Der Mehrwert, der durch den Handel mit Messdaten entsteht und die Integration der Messungen innerhalb der Prozesse, sowie der verstärkte Wunsch für Inline-Messungen führen dazu, dass Messtechnik in aller Regel „Downstream“ durch den Anwender selbst und nur in Sonderfällen durch externe Anbieter designt wird<sup>1</sup>. Teilweise sind die Kunden sogar dazu übergegangen, ihre spezifisch benötigte Messtechnik selbst zu bauen.

### **Faktor Quantenmetrologie der zweiten Generation: Kommerzielle und breite Nutzung von Quanten- metrologie etabliert**

Die Überführung von wissenschaftlichen Erkenntnissen hin zu marktfähigen Produkten ist im Bereich der neuen Quantenmetrologie gelungen. Quantensensoren sind klassischen Sensoren in Bezug auf Auflösung und Genauigkeit überlegen und inzwischen preiswert und kompakt verfügbar. Sie erlauben dynamische Messungen bei sich ändernden Umgebungsbedingungen, erhöhen die Messgenauigkeit und liefern belastbare Ergebnisse auch bei widrigen Bedingungen. Zum Teil kommen Prinzipien aus der Quantenmetrologie auch in den massenhaft produzierten, verteilten Sensoren zum Einsatz<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Auf Quantentechnologie der zweiten Generation basierende Sensoren haben das Potenzial, low-cost und massentauglich zu sein, z. B. Sicksstoff-Fehlstellen (NV)-Zentren in Diamanten. Dort entsteht ein Quantenzustand, der sehr empfindlich gegenüber winzigsten Veränderungen von elektrischen oder magnetischen Feldern, Mikrowellenstrahlung oder Licht ist. Ein entscheidender Vorteil ist, dass diese Quanteneffekte auch bei Raumtemperatur nutzbar sind.

**Faktor Drahtlose Vernetzung von Sensoren und Messsystemen:  
Vollständige drahtlose Vernetzung**

Die vollständige drahtlose Vernetzung von Sensoren und Prozessen mit 5G-Mobilfunk ist gelebter Standard. Die Energieversorgung der verteilten Sensoren ist dabei zum Teil über autonomes Energy Harvesting gewährleistet, zum Teil kommen jedoch auch Batterien oder die passive Versorgung durch drahtloses Aufladen beim Auslesevorgang von RFID-Sensoren (radio-frequency identification) zum Einsatz.

**Faktor Datenhoheit und Bereitschaft zum Teilen von Daten:  
Florierender Datenhandel**

Der Austausch von Daten über Unternehmensgrenzen hinweg ist sowohl Enabler als auch Konsequenz der datengetriebenen Messtechnik. Die Messdaten selbst haben einen Mehrwert und werden entsprechend gehandelt oder über sichere Open Source Plattformen geteilt. Auch die Transparenz und Nachverfolgbarkeit von Daten ist zunehmend gegeben und in kritischen Branchen wie der pharmazeutischen Erzeugung oder der Medizin flächendeckend gewährleistet.

**Faktor Datensicherheit:  
Weitgehende Cyber-Security durch ganzheitliche IT-Optimierung**

Die umfangreiche Vernetzung von Prozessen und der florierende Datenhandel stellte die IT-Sicherheit vor besondere Herausforderungen. Schwerwiegende Zwischenfälle aus dem Bereich der Cyber-Kriminalität, wie z.B. Datendiebstahl, Industriespionage oder Hacker-Angriffe auf Firmen und Infrastruktur haben das Bewusstsein für das Thema verstärkt und IT-Sicherheit für Akteure aus Wirtschaft und Politik zur Priorität werden lassen. Massive Fortschritte in der Technologie, Kostensenkung und Standardisierung der Quantenkryptographie in den letzten zehn

Jahren erlauben heute die sichere und manipulationsgeschützte Kommunikation von Sensoren, Messsystemen und Akteuren. Der sichere Austausch von Daten gilt als beherrschbar.

Der mögliche wirtschaftliche Totalschaden und die mediale Aufmerksamkeit haben die Bereitschaft zur Investition in sichere Systeme massiv erhöht. Ganzheitlich optimierte Systeme gelten als Goldstandard. Sie schließen Soft- und Hardware-Komponenten gleichermaßen ein („Apple-Stil“). Da die Produkthaftung nach wie vor bei den Herstellern der Hardware-Systeme (Messsysteme, Maschinen, Anlagen) liegen, werden diese nach außen abgesichert und die Cyber-Security als Differenzierungsmerkmal vermarktet. Angreifbare Open Source Komponenten und standardisierte IoT-Module werden nicht eingesetzt. Sicherheitslücken werden regelmäßig durch Patches und Updates behoben.

**Faktor Automatisierung und Flexibilisierung der Produktion:  
Vollständige Automatisierung und bestmögliche Effizienz bei Losgröße 1**

Messtechnik ist unmittelbar in die Prozesse integriert und erlaubt daher vollständige Automatisierung der Produktion. Jedes Teil ist zu jeder Zeit eindeutig identifizierbar und kann zurückverfolgt werden. Mess- und Prüfpläne werden automatisch aus den Produktdaten erstellt. Die Verkopplung von Mess- und Prüfdaten und Daten aus der Prozess- und Maschinenüberwachung bietet die Möglichkeit, mehrstufige Prozesse automatisiert im Prozessfenster zu halten. Die ständige Auswertung der Daten, deren Einspielen in KI-Modelle und der Austausch über Unternehmensgrenze hinweg, ermöglicht zusätzliche Optimierung und Flexibilisierung der Prozesse und damit bestmögliche Effizienz bei Losgröße 1.

### Einschätzung durch die Unternehmensvertreter

Dieses Zukunftsbild wird von der überwiegenden Mehrheit der Unternehmensvertreter als eher idealisiert, ambitioniert und sehr optimistisch angesehen.

Sollte sich der Maschinenbau und die Mess- und Prüftechnik in Richtung dieses Szenarios entwickeln, so werden neue Berufsbilder erforderlich. Data Scientists mit fundierten Prozesskenntnissen werden ebenso benötigt werden, wie umgekehrt auch Prozesstechniker zunehmendes Wissen an KI benötigen. Darüber hinaus werden Datenbankentwickler und Administratoren ebenso gefragt sein wie Datenarchitekten, die sich mit den grundlegenden Strukturen und Prinzipien zu Daten und Informationen, ihrer Konstruktion, Nutzung und Weiterentwicklung befassen. Durch die hohe Affinität zum Teilen von Daten in diesem Szenario werden auch zunehmend Datenhändler eingesetzt. Die Anzahl der Arbeitsplätze für gering Qualifizierte wird in diesem Szenario abnehmen.

Auf Produktseite werden zunehmend Softwarelösungen in Form von Dienstleistungen angeboten werden, die z.B. zur Prozessoptimierung in der kompletten Produktion genutzt werden können. Es wird weniger Produktion der Messtechnik in Deutschland stattfinden, die Entwicklung und Herstellung von Quantenmetrologie ist bietet hier eine gute Chance der Diversifizierung.

Ohne Messtechnik-Hardware und den Zugang zu ihr wird es natürlich auch keine Messtechnik-spezifische Software-Entwicklung geben können. Deshalb ist es sehr wichtig für die Messtechnik-Hersteller, auch in der Hardware-Entwicklung Schritt zu halten. Die starke Vernetzung und die digitale Transformation werden aber die Anbieter zwingen, sich Zugang zu Rechenkapazitäten zu verschaffen – dies jedoch auch in entsprechend veränderten Umgebungsbedingungen, zum Beispiel in Form von großen, europäischen Rechenzentren.

Darüber hinaus wird auch der Handel mit Daten ein großer neuer Zweig der Geschäftsmodelle. Dazu gehören auch Nachbardisziplinen wie die Validierung von Daten oder deren Integration.

Als neue Kompetenzen benötigen Unternehmen zunehmend Kenntnisse in Statistik, dem Aufsetzen von Datenmodellen aber auch der Umsetzung und Gewährleistung von Datensicherheit.

# Zukunftsbild

## Smart Data, Systematic Future



### Fortgeschrittene Simulationen komprimieren den Messbedarf auf Schlüsselprozesse

Das Zukunftsbild „Smart Data“ ist ähnlich dem Szenario „Big Data“ stark von der internationalen Digitalisierung der Industrie geprägt. Im Bereich der Mess- und Prüftechnik ist dabei jedoch weniger der ständige Austausch von „Echtzeit“-Messdaten zentral, vielmehr wird die Branche dominiert durch den umfangreichen Einsatz von hoch performanten Simulationen, welche den Bedarf an tatsächlichen Messungen auf ein Minimum reduzieren.

Maschinenbauer und Messtechnik-Anbieter haben sich zusammen mit den neuen technischen Möglichkeiten weiterentwickelt und bieten selbst Datenplattformen an, auf denen nach dem Prinzip der „Datensparsamkeit“ bereits trainierte Modelle und besonders kritische Messdaten gehandelt werden. Entscheidende Enabler für die Entwicklungen sind neben international geltende Standards für Mess- und Prüftechnik u.a. die Nutzung von Quantentechnologie der zweiten Generation im kommerziellen Maßstab und die Gewährleistung von Datensicherheit durch standardisierte Open-Source Software.

### Faktor Digitalisierung: Digitalisierung hat sich durchgesetzt

Die digitale Industrie ist international umgesetzt. Prozesse und Akteure sind umfangreich vernetzt und im Bereich der Mess- und Prüftechnik existieren einheitliche digitale SI-Systeme, welche Vereinfachungen und damit zusätzliches Wertschöpfungspotenzial bieten. Durch Standardisierung und die Existenz von Datenplattformen, auf denen kompatible, bereits trainierte Modelle für diverse Prozesse gehandelt werden, ist es auch für kleine Unternehmen möglich anschlussfähig zu bleiben.

### Faktor Verfügbarkeit von Fachkräften: Kompetenz bei Maschinenbauer und Messtechnik-Anbieter

Die Möglichkeiten in der Simulationstechnik reduzieren den Bedarf an klassischer Messtechnik. Die Branche ist jedoch mit den neuen technischen Möglichkeiten gewachsen und hat sich die nötigen Kompetenzen zu eigen gemacht. Maschinenbauer und Messtechniker bieten selbst Daten-Plattformen an und lösen die Fachkräfte bei den Maschinenbau-Kunden ab, da über Virtual/Augmented-Reality direkt mit dem Shopfloor kommuniziert werden kann. Entsprechend wird verstärkt auf die digitale Kompetenz der eigenen Facharbeiter geachtet und der Beruf ist hoch angesehen.

### Faktor Modellierung und Simulation: Simulation in der breiten Anwendung ersetzt Messtechnik

Simulation und Realität sind über den „Digitalen Zwilling“ unmittelbar verknüpft. Die Möglichkeiten von KI-Modellen und Durchbrüche bei der Rechenperformance durch Entwicklungen im Bereich der Quantentechnologie haben dazu beigetragen, auch bisher analytisch nicht lösbare Probleme zu lösen. Dadurch sind Simulationen so genau, dass Messungen nur noch an wenigen kritischen Punkten nötig sind.

### Faktor Neue Wirkprinzipien und Miniaturisierung: Commodity Sensoren, „Handy misst alles“

Neuartige Sensoren haben an Attraktivität verloren, da die Güte von Messprozessen v.a. auf der Elektronik- und Software-Ebene bestimmt wird. Alles, was für Maschinenbauer darüber hinaus relevant ist, kann über günstige, beliebig kombinierbare Commodity-Sensoren abgedeckt werden. Für neue Wirkprinzipien gibt es kaum einen Markt, da dafür keine Nachfrage herrscht.

**Faktor Kostendruck:  
High-tech, low cost Sensorik**

Messgenauigkeit wird in erster Linie auf der Software-Ebene bestimmt. Dadurch sind günstige, einfach kombinierbare elektronische Sensoren besonders attraktiv. Beliebt sind Sensorsysteme nach dem Baukastenprinzip - vergleichbar mit heutigen Mikrocontrollern (System-on-Chips). Einzelne Sensorkomponenten können je nach Bedarf kombiniert werden und sind dabei durch eine hohe Standardisierung und Massenproduktion äußerst günstig.

**Faktor Standardisierung:  
Anwendung weltweit einheitlicher Standards**

Zwar waren langwierige Verhandlungs- und Standardisierungsprozesse nötig, jedoch konnten international geltende Regelungen erarbeitet werden. Neben Bestimmungen zu Messvorschriften bezieht sich das nicht zuletzt auf digitale Formate und Kommunikationsstandards, was auch die Kompatibilität von Messprozessen und Simulationen ermöglicht.

**Faktor Messtechnik für besondere  
Anwendungsfelder:  
Größere Prozessfenster benötigen weniger genaue Messtechnik**

Beispiel Abfall- und Recyclingtechnik: Neben den Simulationsansätzen reduzieren auch größere Prozessfenster den Bedarf an Messpräzision. Neu entwickelte Materialzusammensetzungen mit besseren Trenneigenschaften und robustere Prozesse, die mit schlechterer Rohstoffqualität auskommen sind hierfür Beispiele. Die Selbstrückkopplung der Systeme mindert dabei zusätzlich den Bedarf an Messdaten.

**Faktor Ökologie und Nachhaltigkeit:  
Messtechnik ermöglicht nachhaltiges  
Wirtschaften**

Messtechnik gilt als essenzieller Bestandteil neuer nachhaltiger Geschäftsmodelle. Durch Innovationen in der Messtechnik entstehen alternative Möglichkeiten Nachhaltigkeit zu messen, zu quantifizieren und ggf. zu bepreisen. Dabei sind insbesondere fortschrittliche Simulationen hilfreich, um z.B. Interaktionen abzubilden und somit gesamte Prozesse zu bewerten.

**Faktor Gesetze und Regularien:  
Smart Data & Smart Law**

So wie die Datenverarbeitung darauf ausgerichtet ist, nur essenzielle Daten tatsächlich zu vermitteln und damit dem Prinzip der Datensparsamkeit folgt, so sind auch Gesetze und Regularien darauf ausgerichtet, nur zentrale oder besonders spezielle Bereiche zu regulieren.

**Faktor Verschiebung der Messtechnik innerhalb  
der Wertschöpfungskette:  
Messtechnik-Anbieter wird nur noch für Spezialfälle benötigt**

Messtechnik-Anwender aus der produzierenden Industrie<sup>1</sup> finden wie im Szenario „Big Data“ auch hier Interesse am eigenen Design oder gar der Herstellung von Messtechnik. Die Messungen finden in der Regel inline, integriert in den Prozessen statt. Messtechnik-Anbieter konzentrieren sich verstärkt auf die Verifikation von Simulationen und auf Spezialfälle. Darüber hinaus haben sich viele Anbieter weiterentwickelt. Über das Betreiben von Datenplattformen und die direkte Betreuung der Fertigung beim Kunden mit Hilfe von Virtual/Augmented Reality, erschließen sie neue Märkte und Geschäftsmodelle.

<sup>1</sup> In anderen Bereichen, wie Medizintechnik, Bauwesen oder speziellen Produktionsumfeldern wie der Chipfertigung, wo die Kunden entweder nicht die Fachkräfte haben oder die

Messgeräte zu kompliziert sind, sind Messtechnik-Anbieter und -Dienstleister generell und auch weiterhin gefragt.

## VDMA-Newsfeed 2030

## Plattform für smarte Daten feiert Geburtstag

Die gemeinsame VDMA-Fraunhofer-Plattform „Smart Machine Data SMaD“ feiert fünfjähriges Bestehen. Gäste aus Industrie, Forschung und Politik blicken im Rahmen der Jubiläumsfeier auf die bisherigen Highlights zurück.

Die Plattform „SMaD“ wurde 2025 gegründet und dient als „Drehkreuz“ von Daten im Bereich Maschinenbau und Prozessoptimierung. Smarte Algorithmen sorgen dafür, dass nur die notwendigen Daten erhoben, übertragen und gespeichert werden. Dies reduziert Messzeiten und spart gleichzeitig Ressourcen durch geringeren Speicher und Serverbedarf. Durch die neutrale Plattform kommen einerseits Unternehmen an Daten aus aktuellen Forschungsprojekten, andererseits profitieren Forschungsprojekte von echten, in Unternehmen angefallenen, anonymisierten Datensätzen, zum Beispiel von trainierten Modellen zum Machine Learning. VDMA und Fraunhofer Gesellschaft planen für das kommende Jahr eine Ausweitung der Plattform.

### Faktor Quantenmetrologie der zweiten Generatio: Kommerzielle und breite Nutzung von Quantenmetrologie etabliert

Entwicklungen im Bereich der Quantentechnologie haben u.a. über eine deutliche Erhöhung von Rechenleistung den Durchbruch von Simulationsansätzen in der Messtechnik ermöglicht. Auch neue Entwicklungen in der Quantenmetrologie konnten aus der Wissenschaft in die Praxis übersetzt werden. Quantensensoren sind klassischen Sensoren in Bezug auf Auflösung, Genauigkeit und Stabilität unter widrigen Bedingungen überlegen, und inzwischen preiswert und kompakt verfügbar.

### Faktor Drahtlose Vernetzung von Sensoren und Messsystemen: Vollständige drahtlose Vernetzung

Sensoren und Messsysteme sind vollständig drahtlos vernetzt. 5G ist zumindest in Industriebetrieben flächendeckend verfügbar und die Energieversorgung der verteilten Sensorkomponenten wird zumeist über autonomes Energy Harvesting gewährleistet. Zum Teil kommen jedoch auch Batterien oder die passive Versorgung durch drahtloses Aufladen beim Auslesevorgang von RFID-Sensoren (radio-frequency identification) zum Einsatz.

<sup>1</sup> Bekannt sind heute beispielsweise Microcontroller-Plattformen wie Raspberry Pi oder Arduino mit standardisierten und programmierbaren GPIO-Schnittstellen. Sie werden i.d.R. mit Linux-Derivaten (Open Source Betriebssysteme) betrieben.

<sup>2</sup> Open Source beschränkt sich nicht nur auf die Software-Entwicklung, sondern kann auch Hardware sein (s. Future Business Trendkarte) – das ist gemeinsame Entwicklung und freies

### Faktor Datenhoheit und Bereitschaft zum Teilen von Daten: Datensparsamkeit

Durch vorherige Simulation und optimierte Modelle ist für Prozesse stets klar, welche Daten, wo und wann erhoben werden müssen. Dies bedeutet, dass der tatsächliche Messbedarf und auch der Austausch an Daten auf ein Minimum begrenzt wird. Smart Data stellt damit eine Art Gegenbewegung zu Big Data Ansätzen dar und hilft Kosten und Ressourcen zu sparen und die Angreifbarkeit des Unternehmens zu minimieren. Durch die Datensparsamkeit innerhalb der Prozesse werden bereits passende Simulationen und trainierte Modelle benötigt, da nur unzureichend Datenmaterial anfällt, um neue KI-Modelle zu trainieren. Daher hat der Handel mit Daten und Modellen großes Gewicht.

### Faktor Datensicherheit: Weitgehende Cyber-Security, u.a. durch Open Source Software

Datensparsamkeit, internationale Standards und die häufig verwendeten „Baukastensensoren“, erlauben auch im Bereich der Cyber-Security die umfangreiche Nutzung von Standardlösungen und deren kontextspezifische Optimierung. Schnittstellen zwischen Sensoren und Prozessen sind nicht mehr die Kernkompetenz einzelner Anbieter, stattdessen werden zumeist standardisierte Module<sup>1</sup> verwendet, die „Open Source“<sup>2</sup> verfügbar sind. Durch die Nutzung der kostenlosen Basiskomponenten werden Ressourcen frei, die für die Optimierung von spezifischen Sicherheitsfragen – etwa bei spezielleren Simulationsmodellen – zur Verfügung

Sharing von Bauplänen, Know-How, usw., umgesetzt beispielsweise bei der Maker-Community („MakerSpaces“, s. Future Business Trendkarte) oder Repair-Cafés, bei Additive Manufacturing bis hin zu ganzen Plattformen für den Automobilbau (Bsp. „Local Motors“).

stehen. Dabei helfen Fortschritte in der Quantenkryptographie auch den Austausch zwischen Akteuren besonders sicher zu gestalten und Datenmanipulation und –diebstahl zu verhindern.

#### **Faktor Automatisierung und Flexibilisierung der Produktion:**

##### **Vollständige Automatisierung und Flexibilisierung bei Mess- und Daten-sparsamkeit**

Die optimale Balance zwischen Simulation und Anpassung des Prozessfensters erlaubt eine weitgehend vollständige Automatisierung ohne jedoch den Mess- und Datenbedarf extrem ansteigen zu lassen. Unterstützend wirkt sich die intelligente Kombination von KI mit dem Wissen und der Erfahrung des Facharbeiters aus, die ebenfalls KI und damit große Datenmengen nur dann einsetzt, wenn dies sinnvoll und notwendig ist.

#### **Einschätzung durch die Unternehmensvertreter**

Das Zukunftsbild „Smart Data, Systematic Future“ wird von den Unternehmensvertretern überwiegend positiv gesehen, da es zwar ambitioniert erscheint, aber durchaus flexibel und wissensstrebend gestaltet werden kann, eine „realistische“ Zukunft, eine „Zukunft mit System“.

Neue Anforderungen an Unternehmen sind Kenntnisse, die im Umgang mit Daten und künstlicher Intelligenz notwendig sind. Hierzu gehören unter anderem algorithmisches Denken, Statistik aber auch die Interpretation von Messergebnissen. Das fundierte Handling von Daten zeigt sich auch am Bedarf an neuen Berufsbildern wie Data Scientists und Data Managern<sup>1</sup>. Grundsätzlich ist Programmieren zu einer der wichtigsten Fähigkeiten und Standardqualifikationen geworden.

Im Bereich Produktionsmittel findet eine Verschiebung der klassischen Messtechnik in den „Mainstream“ statt. Dies bedeutet, dass sich Anbieter von Messtechnik weiter entwickeln müssen. Stand-alone Messgeräte, die nicht automatisiert, manuell betrieben werden, wird es zwar noch geben, jedoch verlieren sie gerade bei hohen Stückzahlen zunehmend an Bedeutung.

Bei den Geschäftsmodellen ist ein Trend zur Differenzierung des Marktes zu erkennen in Systemintegratoren, die auf Komponenten zugreifen und hieraus individuelle Lösungen bauen, automatisieren und implementieren.

Hemmnisse in diesem Zukunftsbild werden unter anderem in der digitalen Infrastruktur gesehen, also zum Beispiel im zu langsamen Ausbau von Mobilfunk (5G) oder DSL-Leitungen zu geringer Bandbreite (Kupferleitungen anstelle von Glasfaser), aber auch in Politik und politischen Rahmenbedingungen.

Ähnlich wie im Szenario „Big Data, Bright Future“ wird auch hier eine Verschiebung bei den Messtechnik-Firmen hin zur Softwareentwicklung gesehen. Dies kann so weit gehen, dass nur eine Mess-App verkauft wird und das eigentliche Produkt darstellt, diese aber durch gute Skalierbarkeit hohe Verkaufszahlen generiert und damit einen ähnlichen Umsatz einführt, wie herkömmliche Messtechnik heute. Komponenten werden weitgehend über das Internet verkauft, die Fertigungstiefe nimmt deutlich ab. Da nahezu alle Geräte vernetzt sind, müssen soweit möglich standardisierte Schnittstellen genutzt werden.

<sup>1</sup> Vom Data Scientist zum Data Manager: Zunehmend wird international die Bezeichnung „Data Steward“ (Datenverwalter,

Datenkurator) benutzt. Im Vergleich zum Scientist zielt dies auf die Dienstleistung ab – Management statt Wissenschaft.

# Zukunftsbild

## Analog Data, Ambivalent Future



### Neue Wirkprinzipien bei stagnierender Digitalisierung

Die Digitalisierung der Industrie ist ins Stocken geraten. Hohe Kosten und geopolitische Spannungen führen zu einer Skepsis gegenüber datenbasierten Verfahren. Die klassische Messtechnik hingegen genießt hohes Ansehen und im Bereich der Sensorik gibt es insbesondere durch den verstärkten Einsatz von bio- und chemiebasierten Wirkprinzipien Neuerungen.

Das führt zur Entwicklung eines ausdifferenzierteren Portfolios an hoch genauen Sensoren für spezifische Anwendungen. Die begrenzte kabelgebundene Vernetzung von Prozessen und der fehlende Austausch von Messdaten zwischen Akteuren verstärkt diese Nischenbildung zusätzlich. De-facto Standards in der Industrie erleichtern dabei zwar die Bildung von Schnittstellen, insgesamt sind die Lösungen für Mess- und Prüftechnik dennoch stark individualisiert, sodass die Kompetenzen von Messtechnikern und -dienstleistern stark gefragt sind.

### Faktor Digitalisierung: Digitalisierung stagniert

Die Digitalisierung konnte sich nicht im großen Maßstab durchsetzen. Zum einen kommt die technologische Entwicklung im IT-Bereich ins Stocken, wodurch die umfangreiche Vernetzung von Prozessen und die Bereitstellung der nötigen Rechenleistung zu kostentreibend ist. Zum anderen herrscht eine Skepsis gegenüber dem Austausch von Daten, welche auch durch die politische Situation und dem Misstrauen gegenüber den Marktführern USA, Europa und China geschürt wird. Einzelne Großunternehmen treiben die Entwicklung jedoch weiter voran und es existieren Insellösungen für bestimmte Prozesse.

### Faktor Verfügbarkeit von Fachkräften: Hohe Verfügbarkeit durch hohe Attraktivität der Aus- und Weiterbildung

Die Messtechnik genießt hohes Ansehen und die Kompetenzen von Messtechnikern sind so gefragt wie nie. Das führt zu einem gesteigerten Interesse von fähigen Jobbewerbern. Durch eine attraktiv und effektiv gestaltete Ausbildung und die Akzeptanz von Weiterbildungsangeboten, kann so der Fachkräftemangel entschärft werden. Neben der Nutzung von neuen Wegen Lerninhalte zu vermitteln, wie etwa Videoseminaren oder dem Einsatz von Augmented Reality, spielt dabei insbesondere die vorausschauende Vermittlung neuer Kompetenzen eine Rolle – neben Statistik und Datenverarbeitung sind hier v.a. Kenntnisse aus dem Bereich der Naturwissenschaften im Umgang mit neuen Bio- und Chemiesensoren von Relevanz.

### Faktor Modellierung und Simulation: Simulation vermehrt in Nischenanwendungen

Das Szenario ist insgesamt geprägt von einer Spezialisierung von Anwendungen. Das trifft auch auf Simulationsansätze zu, welche vermehrt in Nischenanwendungen, mit klarem Problem- und Parameterraum zum Einsatz kommen. Ein generalistischer Ansatz und ein Zusammenwachsen von verschiedenen Prozessen findet (noch) nicht statt.

### Faktor Neue Wirkprinzipien und Miniaturisierung: Neue Wirkprinzipien führen zu Weiterentwicklung der Prozesstechnik

Während Entwicklungen bei datengetriebenen Formaten, wie KI, Simulationen und Quantentechnologie nur langsam Voranschreiten, gibt es insbesondere im Bereich der bio- und chemiebasierten Sensorik Durchbrüche. Beispielsweise neue Möglichkeiten zur Messung von Tempera-

turverteilungen oder CO<sub>2</sub>-Konzentrationen mittels Wandbeschichtungen auf Bakterienbasis, finden im medizinischen Bereich, aber verstärkt auch darüber hinaus vielfältige Anwendung.

#### **Faktor Kostendruck: High-tech, high value Sensor**

In der Regel kommen hoch genaue, aber dafür sehr teure Sensoren zum Einsatz. Die Nutzbarmachung neuer Wirkprinzipien, insbesondere aus dem Bereich bio- und chemiebasierter Sensorik haben zu einer großen Bandbreite an spezifischen Sensoren für spezifische Anwendungen geführt. Das verbessert die Qualität der Messungen, die Zertifizierung, Kalibrierung und Eichung der vielfältigen Systeme ist jedoch auch kostspielig. Langsam voranschreitende Verbesserungen im Bereich von Multi-Agenten-Systemen, Edge-Computing und intelligentem Datenhandling verstärken diese Tendenzen zusätzlich. Die Verbesserung der Sensoren und die Optimierung

von Vernetzung und Datenhandling konkurrieren daher um den Einsatz von Finanzen, wobei verstärkt die Entwicklung besserer Sensoren unterstützt wird.

#### **Faktor Standardisierung: De facto Standards setzen sich durch**

Offiziell bindende Standards existieren nicht. Jedoch haben sich aufgrund der großen Vielfalt bestehender Systeme aus wirtschaftlichen Gründen de facto Standards durchgesetzt, die von einzelnen, besonders einflussreichen Playern getrieben sind. Dies erlaubt zumindest für die gängigsten Anwendungen und Schnittstellen eine gewisse Kompatibilität. Zudem besteht ein höherer intrinsischer Anreiz zur schnellen Adaptation als bei spezifischeren, erarbeiteten Standards.

#### **Faktor Messtechnik für besondere Anwendungsfelder: Technikfeindlichkeit**

Unter den Messtechnikern bzw. bei deren Kunden besteht eine Skepsis gegenüber Veränderungen und neue Technologien werden grundsätzlich kritisch betrachtet. Das betrifft jedoch in erster Linie datengetriebene Formate und die Sicherheit von vernetzten Systemen. Als Reaktion auf diverse Datenskandale und aus Angst vor der Konkurrenz aus den führenden Unternehmen im Ausland, wird die Übermittlung von Daten und der Einsatz von KI eher eingeschränkt. Verbesserungen in der Messqualität durch neue Wirkprinzipien in der Sensorik werden hingegen begrüßt.

#### **Faktor Ökologie und Nachhaltigkeit: Jeder für sich**

In der Messtechnik findet eine eher konservative Weiterentwicklung statt: der Fokus liegt dabei

---

### **VDMA-Newsfeed 2030**

#### **Sensoren zur kontaktlosen Erkennung von viralen Infektionen an Flughäfen erfolgreich eingesetzt**

**Die im vergangenen Monat an zunächst vier internationalen Flughäfen installierten „Virusdetektoren“, die gemeinschaftlich von verschiedenen Mitgliedsunternehmen des VDMA entwickelt worden waren, scheinen die Verbreitung der neuartigen Virusinfektion Astra (COVID-30) maßgeblich einzudämmen.**

Die Nutzung von neuartigen biologischen Sensoren, welche auf spezifische virale Erreger ausgerichtet werden können und diese sicher und ohne gesundheitliche Risiken für Passagiere erkennen können ist seit letztem Monat möglich. Die Umsetzung gelang einem Zusammenschluss aus Mitgliedsunternehmen des VDMA, welche die neuartigen Sensoren entwickeln, kostengünstig in bestehende Detektoren integrieren und dabei die notwendigen Qualitätsvoraussetzungen der WHO erfüllen konnten. Laut einer ersten Studie des Robert-Koch-Instituts helfen die Detektoren dabei, die globale Verbreitung des neuartigen Erregers aufzuhalten, da auch Träger ohne Symptome schnell erkannt und entsprechend behandelt werden können.

Nachdem die internationale Verbreitung von viralen Erkrankungen aber auch deren medizinische Bekämpfungsmöglichkeiten in den vergangenen Jahren deutlich zugenommen hatte, galt die schnelle, sichere und kostengünstige Erkennung von Infektionen als letzte große Herausforderung, um die globale Verbreitung der Krankheiten zu unterbinden, ohne präventiv flächendeckende Quarantäne-Maßnahmen zu verhängen.

---

auf der Optimierung der Technologien in einzelnen Anwendungsbereichen, die Vernetzung verschiedener Systeme und Akteure wird weniger unterstützt eher ausgebremst. Das spiegelt sich auch in Bezug auf Nachhaltigkeitsaspekte wider: zwar achten die Hersteller verstärkt auf ihren eigenen ökologischen Fußabdruck, eine übergreifende Bilanzierung findet hingegen nicht statt.

#### **Faktor Gesetze und Regularien: Alles wie gehabt**

Gesetze und Regularien werden „wie gehabt“ weiterentwickelt. Außer neuen Anforderungen durch z.B. den verstärkten Einsatz von bio- und chemiebasierten Wirkmechanismen, ändert sich am Prozess der Entwicklung von Gesetzen und Regularien und deren Organisation kaum etwas.

#### **Faktor Verschiebung der Messtechnik innerhalb der Wertschöpfungskette: Messtechnik-Anbieter wird benötigt**

Auch in Bezug auf die Rolle der Messtechnikanbieter innerhalb der Wertschöpfungskette gibt es keine nennenswerten Veränderungen. Das bedeutet, Messtechnik-Anbieter „Upstream“ bleiben auch für produzierende als Designer, Hersteller und Dienstleister essenziell. Kalibrierung und Zertifizierung von Messergebnissen finden in der Regel durch spezielle Dienstleister statt.

#### **Faktor Quantenmetrologie der zweiten Generatio: Kein Einsatz von Quantenmetrologie**

Quantensensorik ist in der Wissenschaft weiterhin ein Thema, marktfähige Produkte sind jedoch nicht etabliert, da die Robustheit der Messergebnisse unter Realbedingungen nicht ausreichend gegeben ist und zudem die Größe der Systeme und deren Preis eine kommerzielle Anwen-

dung bisher verhindern. Laborversuche lassen jedoch grundsätzliches Potenzial erkennen und einzelne Start-Ups versuchen verstärkt mit quantenbasierter Messtechnik auf den Markt zu kommen.

#### **Faktor Drahtlose Vernetzung von Sensoren und Messsystemen: Vernetzung über Kabel**

Bezüglich der Vernetzung von Prozessen stehen sich die Vorteile von vernetzten Systemen und die Bedenken bezüglich Datensicherheit gegenüber. Insbesondere bezüglich der Sicherheit drahtloser Systeme herrscht Skepsis, was deren Weiterentwicklung erschwert und zu höheren Preisen für entsprechende Systeme führt. Als „Mittelweg“ wird nicht selten auf die Vernetzung bestimmter Prozesse per Kabel zurückgegriffen.

#### **Faktor Datenhoheit und Bereitschaft zum Teilen von Daten: Messdaten werden nicht geteilt**

Messdaten gelten als Schlüsselfaktor für den Wettbewerbsvorsprung und werden daher aus Angst vor der Konkurrenz nicht geteilt. Das hat den Effekt, dass die Möglichkeiten datenbasierter Optimierung von Messprozessen durch KI und Simulation, durch mangelnde Trainingsdatensätze weit hinter den Erwartungen zurückbleiben und Messtechnikanbieter de Facto kaum von ihren eigenen Daten profitieren.

#### **Faktor Datensicherheit: Weitgehende Cyber-Security, u.a. durch Nutzung von Open Source Software**

Datensicherheit hat einen hohen Stellenwert, was die Gestaltung von Messprozessen nicht unwesentlich beeinflusst. D.h. Messdaten werden in der Regel nicht zwischen verschiedenen Akt-

euren ausgetauscht und auch die Vernetzung interner Prozesse einzelne Anbieter findet meist kabelgebunden statt. Sicherheitsrisiken werden daher von vornherein minimiert. Die vorhandenen Schnittstellen und die Verwaltung der Messdaten baut zudem verstärkt auf Open-Source Lösungen<sup>1</sup> auf. Die breite Nutzung solcher „Basislösungen“, erlaubt es der Community, Schwachstellen schneller zu identifizieren und zu beheben. Standardlösungen sind nicht immer ausreichend. Die große Bandbreite an verfügbaren Sensoren macht es möglich, diese spezifisch auf den Kunden abgestimmt und individualisiert zu kombinieren und sich mit solchen Lösungen zu differenzieren. Die quasi kostenlos verfügbaren Software-Sockel („Linux-Stil“) sparen Ressourcen ein. Individuelle Lösungen, die auf diese aufsetzen, können auch besondere Sicherheitsbedarfe preisgünstig abdecken.

#### **Faktor Automatisierung und Flexibilisierung der Produktion:**

##### **Kaum Verknüpfung, kaum Flexibilität**

Durch die mangelnde Verknüpfung der Systeme und die stark ausdifferenzierten Wirkmechanismen der Messtechnik in den unterschiedlichen Prozessen, lässt sich die Produktion kaum flexibilisieren und auch nur bedingt automatisieren.

#### **Einschätzung durch die Unternehmensvertreter**

Im Szenario „Analog Data“ findet Veränderung in der Mess- und Prüftechnik weniger durch digitale Formate statt, sondern verstärkt durch den Einsatz neuer Wirkmechanismen aus dem Bereich der bio- und chemiebasierten Sensorik. Durch die Freisetzung von Mitteln aus der zurückgefahrenen Digitalisierung und den Einsatz standardisierter Komponenten entstehen in di-

versen Bereichen hoch spezialisierte „Insellösungen“. Hierfür sind auch in der Aus- und Weiterbildung zunehmend Kompetenzen aus naturwissenschaftlichen Bereichen von Bedeutung.

Das ist insbesondere der Fall, da Messtechnikanbieter, durch den hohen Spezialisierungsgrad einzelner Sensoren, Teile der Messgeräteproduktion auslagern bzw. zukaufen und sich stattdessen auf ihr Kerngeschäft besinnen, das klassischerweise in der Produktentwicklung neuer Messsysteme besteht.

Die Bedienkompetenz der Anbieter für die vielfältigen Systeme spielt dabei eine zunehmend große Rolle, um die speziellen Messkomponenten und –funktionen zusammenzubringen. Hierbei ergibt sich auch eine Möglichkeit, sich als Messtechnikentwickler hervorzuheben, da bei einer so großen Vielfalt von speziellen Sensoren und Kompetenzen eine einfache Bedienbarkeit und Vereinbarkeit einen klaren Wettbewerbsvorteil bieten kann.

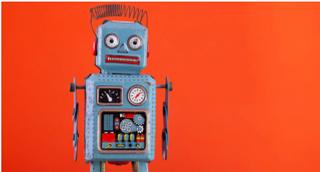
Nicht für alle Märkte, Regionen und Kunden auf der Welt sind „volldigitalisierte“ Angebote von Maschinen, Anlagen oder Messtechnik ideal – aus verschiedenen Gründen. Für kundenangepasste Lösungen, z.B. in Schwellenländern, hat sich der Ansatz der „frugalen Innovation“ durchgesetzt. Gerade biobasierte Messtechnik könnte hier einen großen Kundennutzen und Wettbewerbsfähigkeit bringen. Das „Analog Data“-Szenario kann auch vor diesem Hintergrund interessant für die Branche sein.

<sup>1</sup> Open Source ist kein Widerspruch zum eingeschränkten Datenaustausch in diesem Szenario. Die Entwicklung von Open Source Software beinhaltet nicht notwendigerweise Sharing von echten Daten. Es existieren Startups, die Prozessdaten

oder Bewegungsprofile so anonymisieren, dass der Charakter der Daten für eine Analyse oder Training von KI nach wie vor geeignet sind, ohne Datenschutzbedenken zu provozieren.

# Zukunftsbild

## No Future for More Data



### Aufbäumen gegen den Fortschritt: keine Standards, kein Austausch, kaum Veränderung

Das Zukunftsbild „No Future for more Data“ ist geprägt von dem Versuch, an bewährten Konzepten und Geschäftsmodellen der Mess- und Prüftechnik festzuhalten.

Innovationen bezüglich neuartiger Wirkprinzipien bei Sensoren, Simulationsmöglichkeiten, KI-basierten Auswertungsalgorithmen und Quantenmetrologie werden durch fehlende Standards, mangelnder Bereitschaft zum Teilen von Daten, großer Skepsis beim Anwender und stark regulierten Vorgaben für Neuerungen erschwert. In einigen Bereichen werden dennoch Neuerungen von Newcomern vorangetrieben.

#### Faktor Digitalisierung: Digitalisierung stagniert

Sinnbildlich für die Situation in diesem Szenario existieren auch im Bereich der Digitalisierung vereinzelt Insellösungen und Vorreiter, die umfangreiche Vernetzung von Akteuren und Prozessen in der Industrie hat sich jedoch nicht durchgesetzt. Neben zu hohen Kosten durch ausbleibende Innovationen bei einigen Enabler-Technologien, spielen hier Sicherheitsbedenken und politische Spannungen eine Rolle.

#### Faktor Verfügbarkeit von Fachkräften: KI ersetzt Fachkräfte

Ein Bereich, in dem Neuerungen immer stärker erkennbar sind, bezieht sich auf den Fachkräfte-Nachwuchs. Die Branche leidet unter einem Fachkräftemangel und es wird versucht, diesen durch den Einsatz von eLearning-Systemen zu begegnen, die sich gestützt durch KI auf den Lernenden einstellen. Weil die KI „unsichtbar im Hintergrund“ arbeitet, wird sie entweder nicht wahrgenommen oder als vertrauenswürdig und

neutral angesehen. Zur Durchführung von Messungen aber insbesondere auch für die Interpretation von Messdaten werden verstärkt Algorithmen eingebunden, was jedoch die Kluft zwischen dem Engineering, also Forschung und Entwicklung und der Fertigungsebene vertieft und das Ansehen von gering qualifizierten Hilfskräften weiter verschlechtert. Im Gegensatz zum Szenario „Big Data“ wird KI jedoch nicht selbst entwickelt, sondern von großen Intermediären angeboten. Sie sind Gewinner, während Messtechnik-Anbieter Gefahr laufen, zur „Commodity“ zu werden.

#### Faktor Modellierung und Simulation: Simulation vermehrt in Nischenanwendungen

Auch im Bereich der Simulation lassen sich Fortschritte erkennen. Diese beziehen sich jedoch insbesondere auf Nischenanwendungen mit klarem Problem- und Parameterraum, da für die Entwicklung eines generalistischen Ansatzes keine, bzw. nicht ausreichend Daten zur Verfügung stehen.

#### Faktor Neue Wirkprinzipien und Miniaturisierung: Neue Wirkprinzipien führen zu Weiterentwicklung der Prozesstechnik

Bei der Entwicklung neuer Wirkprinzipien zeichnen sich ebenfalls Potenziale ab. Insbesondere beim Einsatz von bio- und chemiebasierter Sensorik gibt es große Fortschritte und entsprechende Sensoren finden in der Medizin aber auch darüber hinaus Anwendung. Auch im Bereich der KI-basierten Elektronik werden Fortschritte verzeichnet. Die Entwicklung verläuft aufgrund der mangelnden Datenlage jedoch schleppend und die Implementierung trifft in vielen Bereichen auf Widerstand.

### **Faktor Kostendruck: High-tech, high value Sensor**

Statt der Optimierung durch umfangreiche Vernetzung, den Einsatz von KI-basierter Auswertung oder Simulationen oder anderen Prozessoptimierungen, werden die Messergebnisse in der Regel durch spezifische, hoch genaue Sensoren optimiert, die jedoch entsprechend teuer sind. Vereinzelt gibt es jedoch innovative Anbieter, die versuchen, über günstige, jedoch vernetzte Systeme eine vergleichbare oder bessere Genauigkeit zu erzielen, was sich jedoch im großen Maßstab noch nicht durchgesetzt hat.

### **Faktor Standardisierung: Kein einheitlicher Standard**

Das Scheitern neuartiger Ansätze, liegt nicht zuletzt am Mangel von Standards, an denen angeknüpft werden kann. Technische Potenziale können durch untereinander nicht kompatible, proprietäre Standards nicht ausgeschöpft werden. Einflussreiche Player versuchen ihre eigenen Standards durchzusetzen und nehmen die Unzufriedenheit der Kunden in Kauf, die mit den

Schnittstellen häufig überfordert sind und dadurch nur eingeschränkte Möglichkeiten haben verschiedener Systeme miteinander zu kombinieren. Das erlaubt es den etablierten Anbietern zunächst, Newcomer auszuschließen, da diese (noch) keine umfassenden, ausgereiften Lösungen anbieten können.

### **Faktor Messtechnik für besondere Anwendungsfelder: Technikfeindlichkeit**

Die Einführung innovativer Konzepte wird zusätzlich durch eine gewisse Technikfeindlichkeit der Anwender erschwert. Veränderungen und neue Technologien werden grundsätzlich kritisch betrachtet und Sensoren werden eher sparsam eingesetzt und nur ungern vernetzt.

### **Faktor Ökologie und Nachhaltigkeit: Messtechnik weitgehend unbeeinflusst**

Zwischen Ökologie und Messtechnik besteht kein Zusammenhang. D.h. weder spielt die Messtechnik eine verstärkte Rolle in der Bilanzierung von bestimmten Prozessen, noch wird innerhalb der Messtechnik besonders auf Nachhaltigkeit geachtet. Der Druck von außen lässt jedoch erkennen, dass sich beides in absehbarer Zeit ändern muss.

### **Faktor Gesetze und Regularien: Überregulierung**

Zwar bestehen keine einheitlichen Standards, um die Kompatibilität verschiedener Messverfahren zu gewährleisten –was nicht erlaubt ist, ist jedoch exakt geregelt. Die schiere Menge an Regeln und Gesetzen schränkt dabei Entwicklungspotenziale stark ein.

---

## **VDMA-Newsfeed 2030**

### **Hoffnung im Standardisierungsstreit: Endlich Bewegung nach jahrelangem Stillstand**

**Nachdem bei der Standardisierung neuer Sensoren durch langwierige Prozesse und juristische Auseinandersetzungen seit langem Stillstand herrscht, ist endlich Licht am Ende des Tunnels erkennbar.**

Führende Messtechnikanbieter, Messtechnikkunden, ausgewählte Startups aus der Branche und Normungsvertreter kommen auf Einladung des VDMA in der kommenden Woche zum ersten Mal zusammen. Ziel ist die Erarbeitung einer gemeinsamen Grundlage, um Standardisierungsverfahren in Zukunft reibungsloser zu gestalten und dabei den Bedarfen aller Beteiligten gerecht zu werden. Deutsche Messtechnikanbieter und -innovatoren beklagen, dass sie durch Überregulierung auf der einen Seite und fehlende Standards auf der anderen Seite im internationalen Vergleich immer stärker in Bedrängnis geraten. Gleichzeitig laufen Standardisierungsbemühungen zunehmend ins Leere, da vorgeschlagene Lösungen von einigen Marktakteuren als Benachteiligung empfunden und entsprechend juristisch angefochten werden. Das Zusammentreffen beim VDMA in Frankfurt gilt weithin als Durchbruch und Hoffnungsschimmer.

---

**Faktor Verschiebung der Messtechnik innerhalb der Wertschöpfungskette:  
Messtechnik-Anbieter wird nur noch für Spezialfälle herangezogen**

Messtechnik-Anbieter haben für die fortschreitenden Bedarfe der Produktionstechnik, insbesondere bei Inline-Prozessen keine ausreichend guten Angebote entwickelt, sodass die Kunden zunehmend dazu übergegangen sind, Messtechnik selbst zu designen und herzustellen. Für bestimmte Kundengruppen, wie z. B. Medizintechnik oder Bauwesen werden sie jedoch nach wie vor auch zur Durchführung von Messungen und deren Interpretation und Validierung herangezogen, weil in diesen Branchen die Fachexpertise fehlt.

**Faktor Quantenmetrologie der zweiten Generation:  
Einsatz von Quantenmetrologie nur im High-End Bereich**

Fortgeschrittene Quantenmetrologie findet zunehmend auch außerhalb der Wissenschaft Anwendung. Jedoch sind die Kosten nach wie vor sehr hoch, sodass sich die Nutzung auf hochpreisige Sektoren und Spezialfälle beschränkt, wie beispielsweise autonomes Fahren oder medizinische Diagnostik für Selbstzahler.

**Faktor Drahtlose Vernetzung von Sensoren und Messsystemen:  
Keine Vernetzung**

Mit Ausnahme einzelner Vorreiter, sind Sensoren und Messsysteme in der Regel nicht miteinander vernetzt. Grund dafür sind zum einen Einschränkungen bei der Bandbreite und der Energiezufuhr (Energy Harvesting ist unausgereift), zum anderen haben aber auch negative Erfahrungen bezüglich der Data-Security großen Einfluss. Nach diversen Datenskandalen sind die

wenigsten Unternehmen bereit (drahtlose) Vernetzung zu etablieren, was es neuen Ansätzen erschwert auf den Markt zu kommen.

**Faktor Datenhoheit und Bereitschaft zum Teilen von Daten:  
Messdaten werden nicht geteilt**

Probleme mit der Datensicherheit und diverse Datenskandale haben auch die Bereitschaft zum Teilen von Daten massiv eingeschränkt. Messdaten gelten als geistiges Eigentum und als Schlüsselfaktor für den Wettbewerbsvorsprung. Durch den mangelnden Austausch von Daten zwischen den Akteuren können diese jedoch auch nur eingeschränkt Mehrwert erzeugen, da für KI-basierte Optimierungsmodelle z.T. nicht ausreichend Trainingsdatensätze zur Verfügung stehen.

**Faktor Datensicherheit:  
Vernachlässigte Cyber-Security: Kein Bewusstsein, keine Differenzierung**

Schwerwiegende Cyber-Angriffe auf Firmen liegen zwar schon etwa zehn Jahre zurück. Nach diversen Datenskandalen überwiegt dennoch Skepsis und Zurückhaltung bei der Vernetzung von Systemen und Akteuren. Sichere, für Hard- und Software ganzheitlich optimierte IT-Systeme sind aufgrund der geringen Nachfrage besonders kostspielig und sind durch die mangelnde Kooperationsbereitschaft zum Austausch von Daten für Open Source Communities wenig attraktiv. Statt in Cyber-Security zu investieren versuchen viele Firmen das Thema daher eher zu umgehen, indem eine umfangreichere Systemintegration vermieden wird. Die Produkthaftung liegt beim Hersteller des Hardware-Systems (Messsystem, Maschine, Anlage) und nicht beim Software-Provider. Auch deswegen werden Änderungen von existierenden Systemen vermieden. Insgesamt herrscht ein geringes Bewusstsein für die Eigenverantwortung bezüglich der Cyber-Security in Unternehmen.

In den Bereichen, in denen eine Vernetzung stattfindet, setzen die Unternehmen häufig auf günstige, standardisierte IoT-Systeme, deren Sicherheit zwar kontinuierlich weiterentwickelt wird („Android-Stil“), die aber ohne kontextspezifische Optimierungen dennoch große Unsicherheiten mit sich bringen. Nur besondere Produkte werden regelmäßig mit Updates versorgt. IT-Sicherheit hat nur einen geringen Beitrag als Differenzierungsmerkmal.

#### **Faktor Automatisierung und Flexibilisierung der Produktion: Nur in Spezialfällen**

Weder Automatisierung noch Flexibilisierung bzw. Individualisierung der Fertigung entscheidet sich grundlegend von heutigen Konzepten. Zwar gibt es an einigen Stellen Fortschritte, die vollständige Automatisierung findet sich jedoch nach wie vor nur in größeren Serienproduktionen und die individuelle Fertigung bzw. Fertigung von Prototypen wird von kleinen, spezialisierten Unternehmen angeboten und ist nach wie vor kostspielig.

#### **Einschätzung durch die Unternehmensvertreter**

Zunächst finden sich in diesem Szenario keine grundlegenden Umbrüche. In den meisten Bereichen sind Entwicklungen erkennbar, die jedoch aufgrund von Technologieskepsis, Überregulierung und mangelnden Standards verzögert werden. Diese Konstellation ist allerdings äußerst sensitiv gegenüber „Game Changer“ und es scheint nur eine Frage der Zeit, bis sich ein Paradigmenwechsel durchsetzt – nicht zuletzt aufgrund der internationalen Konkurrenz.

Für die Zukunftsfähigkeit der Unternehmen scheint in der Aus- und Weiterbildung daher die verstärkte Vermittlung von digitalen Kompetenzen – insbesondere im Umgang mit KI – schon jetzt bedeutsam. Dabei muss darauf geachtet

werden, dass „KI-Ingenieure“ neben der Schulung im Umgang mit Daten, dennoch ein Prozessverständnis für relevante Vorgänge im Bereich Mess- und Prüftechnik mitbringen. Hier ergeben sich auch zunehmend Möglichkeiten für neue Geschäftsmodelle, z.B. im Anbieten von KI-basierten Prozessauswertungen als Dienstleistung.

Abgesehen von diesen Entwicklungspotenzialen, auf die sich Unternehmen vorausschauend vorbereiten sollten, finden sich gegenwärtig vor allem Chancen durch neue Wirkprinzipien in der Sensorik und damit in der Bereitstellung von spezifischer Highend-Sensorik. Fehlende Standards verlangen dabei eine hohe Variabilität und Flexibilität bei den Messmitteln. Auf Kunden-seite bestehen Strategien z.T. in der Steigerung der Prozessstabilität, um Sensorik weitestgehend überflüssig zu machen und damit die Inkompatibilität von Schnittstellen zu umgehen. Auch das erhöht den Druck auf Messtechnik-Anbieter, sich auf Standards zu einigen.

# Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

Der Abschluss der vorliegenden Studie entstand während der SARS-CoV-2 Coronavirus-Pandemie, die die Bedeutung von verlässlichen und korrekt interpretierten Messdaten drastisch gezeigt hat: Ohne solche Daten sind faktenbasierte Entscheidungen nicht möglich, die teils gravierende Einschnitte für Wirtschaft und Gesellschaft nach sich ziehen. Gleichzeitig wurde aber auch deutlich, dass sich Rahmenbedingungen durch disruptive Ereignisse wie Krisen aber auch durch bahnbrechende Innovationen schlagartig verändern und bisher als sicher eingestufte Vorhersagen ins Gegenteil verkehren können. Die aktuellen Beispiele reichen von Social Distancing und Home Office bis zur Fernsteuerung von Fabriken, Rückbesinnung auf „second source“ in Lieferketten und Tendenzen zur Deglobalisierung. Obwohl Pandemien als „schwarze Schwäne“ in vielen Zukunftsszenarien vor 2020 vorhanden waren, so schien ihr Eintritt den meisten Playern doch zu unwahrscheinlich. Der Vorteil von Szenarien: Sie erlauben es, auch scheinbar unwahrscheinliche Events vorzudenken und sich vorzubereiten – mit Corporate Foresight und „Preparedness“ kann eine gewisse Resilienz gegenüber disruptiven Ereignissen erreicht werden: Eine grundsätzliche und wichtige Unternehmensstrategie.

Die vorliegende Studie zeigt: Mess- und Prüftechnik ist seit jeher Fortschrittsmotor für den Maschinenbau und wird es auch in Zukunft bleiben. Die Ausarbeitung unserer Zukunftsszenarien versucht die oben beschriebenen Unsicherheiten durch ein möglichst breites Spektrum von Faktoren und Annahmen abzudecken, ohne die „Bodenhaftung“ und Relevanz für den Maschinen- und Anlagenbau zu verlieren. Im Vergleich der Szenarien ergeben sich dabei Themen, welche die Unterschiedlichkeit zwischen verschiedenen Zukunftsbildern antreiben und solche, die über unterschiedliche Zukünfte hinweg ihre Bedeutung behalten.

Der zentrale Treiber für die zukünftige Entwicklung der Mess- und Prüftechnik im Maschinenbau bezieht sich auf die Geschwindigkeit und

das Ausmaß der digitalen Transformation hin zu Industrie 4.0 und zu einer stärkeren Integration von Mess- und Fertigungsprozessen. Inline statt Offline-Messungen, vernetzte, verteilte Sensoren, Predictive Maintenance, Cloud-Computing, Digitaler Zwilling, Quantenmetrologie und viele andere Trends haben den Bezug zu digitalen Formaten gemein.

Sichere und leistungsfähige IT-Infrastruktur, gesetzliche Rahmenbedingungen und einheitliche Standards sind dabei wichtige Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche, weitreichende digitale Transformation der Mess- und Prüftechnik. Mögliche Reaktionen bei Mess-Dienstleistern auf eine Verschiebung der digitalisierten Prozesse hin zum Anwender, sind wesentlich veränderte Geschäftsmodelle. Statt der Durchführung von Labormessungen ist hier denkbar, dass verstärkt Softwareentwicklung stattfindet und der Mehrwert durch die kundengerechte Integration unterschiedlicher Messsysteme und das Vermitteln von Anwendungs- und Auswertungswissen entsteht.

Neben Entwicklungen im digitalen Bereich, hat auch die Entwicklung neuer Wirkprinzipien, etwa im Bereich der chemischen und bio-basierten Sensorik großes Potenzial bestehende Verfahren in der Mess- und Prüftechnik maßgeblich zu verändern und zu erweitern. Neuartige Sensoren bieten neue Messmöglichkeiten insbesondere im Bereich der Medizin, bei Nahrungsmitteln und im Umwelt Monitoring. Gleichzeitig stehen auch diese Entwicklungen im Zusammenhang mit der Digitalisierung. Neuartige Sensoren ermöglichen auch im produzierenden Gewerbe das Erfassen zusätzlicher Parameter, die für sich genommen Mehrwert schaffen oder aber in einem vernetzten Messsystem einfließen können. Die KI-basierte Auswertung der Sensorergebnisse haben umgekehrt auch Potenzial für die Weiterentwicklung der Sensoren.

Ein neues Wirkprinzip erlangte in unseren Workshop-Diskussionen besondere Beachtung als eigener Einflussfaktor: Die Quantentechnologie –

ein interdisziplinäres, heute noch sehr forschungslastiges Feld, das in den letzten Jahren international große Beachtung gefunden hat. Deutschland ist bei der Forschung zu Quantentechnologien gut aufgestellt; insbesondere im Bereich Metrologie besteht auch ein hohes industrielles Interesse: Marktschätzungen zu Quantensensoren liegen bei 2,2 Mrd. USD im Jahr 2028. Schnelle Einstiege in Nischenmärkten sind möglich, der Massenmarkt scheint noch weit entfernt. Interessante Beispiele sind die Medizintechnik oder Bodenanalysen. Spezi- alsensoren sind bereits verfügbar, allerdings noch sehr teuer. Wir haben außer der Quantenmetrologie auch die Quantenkryptographie für die Datensicherheit aufgenommen. Quantencomputing ist einsatzbereit für Spezialfälle, für den breiten Einsatz bei Mess- und Prüftechnik jedoch noch nicht relevant. Ähnlich wie bei KI und Machine Learning können schnelle Fortschritte die Situation aber schlagartig ändern.

Um die digitale Transformation und die Entwicklung neuartiger Wirkmechanismen voranzutreiben und davon profitieren zu können, ist die Gewinnung und Weiterbildung von geeigneten Fachkräften ein wichtiger Dreh- und Angelpunkt. Das Ausmaß der Digitalisierung bestimmt nicht nur das nötige Wissen der Fachkräfte, sondern hat auch Einfluss darauf, welche Berufsgruppen neu entstehen oder aber im Zuge von KI und Automatisierung überflüssig werden.

## Handlungsempfehlungen

### Unternehmen

Während Digitalisierung, neue Wirkprinzipien sowie Anforderungen an und Verfügbarkeit von Fachkräften in allen Bereichen der Mess- und Prüftechnik großes Potenzial für Veränderung haben, sind durch die Heterogenität des Feldes und die unterschiedlichen Perspektiven von Messtechnik-Herstellern und -Anwendern kon-

krete Ableitungen abhängig vom jeweiligen Umfeld und den Bedarfen des Unternehmens. Die vorgestellten Zukunftsbilder können zur Entwicklung einer Strategie genutzt werden, um die Chancen der neuen, progressiven Mess- und Prüftechnik unternehmensspezifisch zu detaillieren und Herausforderungen frühzeitig zu identifizieren. Übergeordnet sind folgende Fragestellungen interessant – und zwar für alle Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus, nicht nur die Anbieter von Mess- und Prüftechnik:

- Welche Rolle spielt die Mess- und Prüftechnik beispielsweise in puncto Präzision, Qualität, Sicherheit, Forschung und Entwicklung oder als Innovationstreiber im Unternehmen? Von welchen Zulieferern, Dienstleistern und Lieferketten sind Sie abhängig?
- Wie stark ist das Unternehmensumfeld von der digitalen Transformation betroffen und wie schnell vollziehen sich Veränderungen?
- In welchen Bereichen ist ein Zusammenwachsen von Mess- und Produktionsprozess wünschenswert und wo besteht nach wie vor Bedarf an Offline-Messungen im Prüfraum?
- Wie können Messdaten innerhalb aber auch außerhalb des Unternehmens ausgetauscht werden?
- Welche Messdaten bieten besonderen Mehrwert und wie können diese möglicherweise monetarisiert werden?
- Welche neuen Wirkprinzipien (z.B. bio- oder chemiebasiert) kommen für die Messbedürfnisse der Kunden in Frage? Ist low-cost Sensorik (z. B. Organische und gedruckte Elektronik) eine Option?
- Welche Anforderungen werden an zukünftige Fachkräfte gestellt? Braucht es (eigenes, zusätzliches, neues) Know-How insbesondere in der Mess- und Prüftechnik? Was bedeutet

dies für die betriebliche Aus- und Weiterbildung?

- In welchen Bereichen ist ggf. ein Outsourcing von notwendigen Kompetenzen sinnvoll?

Das Verhältnis von Maschinenbauern und deren Kunden zu Anbietern und Dienstleistern von Mess- und Prüftechnik ist heute überwiegend eine klassische Kunden-Lieferanten-Beziehung, d.h. Beschaffung, Einkauf und erschöpft sich meist in Verkauf von Hardware und dazugehöriger Software, die hoch spezialisiert und angepasst sein kann.

In den Zukunftsbildern tauchen neue Geschäftsmodelle und neue Akteure auf, die Plattformökonomie, „Metrology-as-a-Service“, „Virtual sensor design“, Datenhandel oder Kalibrier- und Eichservices ins Spiel bringen, vereinfacht durch das neue SI-System: Maschinenbauer haben damit das Potenzial selbst zu kalibrieren oder gar zu eichen. Insbesondere zwei neue Felder tauchten in unseren Workshops auf:

- Problemlösung verkaufen: Das beinhaltet generell mehr Daten, die Verknüpfung von Daten mit Expertenwissen, Signifikanz der Daten für Problemlösung steigt sowie Datenfusion und anschließendes Datenmanagement schafft Mehrwert für Anwender
- Metrology-as-a-Service, das ist die Vermietung von Messtechnik, mit den Aspekten Ausschließlich Verkauf von Lizenzen für Messung, stückzahlabhängige Berechnung, örtliche Trennung von Erfassung und Auswertung von Messdaten (als Dienstleistung) sowie die Möglichkeit, verschiedene Produktionsstätten mit unterschiedliche Ausprägungen und Bedürfnissen zusammenzufassen.

Wie können Unternehmen mit dem Thema Quantentechnologie umgehen? Wenn es jetzt darum geht, Quanteneffekte nicht mehr nur indirekt zu nutzen, wie es Laser und Transistor tun, sondern sie gezielt zu kontrollieren, dann muss

es das Ziel sein, dass nicht nur Institute und große Konzerne, sondern auch Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus diese Entwicklung gestalten und kundenorientiert umsetzen. Die Möglichkeiten dieser „Quantentechnologien der zweiten Generation“ sind so groß, dass sie erhebliche Auswirkungen auf die Wirtschaft und Gesellschaft haben können. Deshalb gilt es, sie auf dem Radar zu behalten: Ein Engagement in Quantentechnologien ist eine strategische Investition und sollte – privat oder öffentlich – in Form von ausgewählten Leuchtturmprojekten erfolgen, an denen Industrie und Institute gleichermaßen beteiligt sind. Die Fokussierung auf diese strategischen Projekte erlaubt es in einem zweiten Schritt, gezielt die hierfür nötigen Werkzeuge zu entwickeln, sinnvolle Anwendungsfelder und Geschäftsideen zu erkunden, sowie Entwicklungspartnerschaften, Kompetenznetzwerke bis hin zu kompletten Lieferketten aufzubauen. Anders als die medial sehr präsenten Quantencomputer ist die Quantenmetrologie hier am weitesten in Richtung Anwendung fortgeschritten.

Eine Nationale Koordinierungsstelle, die die organisatorische und fachliche Entwicklung in den nächsten Jahren führt, kann wesentlich zu einer Konvergenz der akademischen und industriellen Prozesse beitragen. Die Aktivitäten sollten durch gezielte Marktforschung ergänzt werden, um gemeinsamen Ziele und Geschäftsmodellen zu identifizieren.

### Forschung und Wissenschaft

Das Titelbild dieser Studie zeigt ein Herzstück des Gravitationswellendetektors Virgo in Italien. Vernetzt mit zwei Anlagen in den USA gleicher Bauart ist es möglich, winzige Verformungen der Raumzeit nachzuweisen, die durch massereiche schwarze Löcher in Abermillionen Lichtjahren Entfernung ausgelöst werden. Quanteneffekte, deren Existenz Albert Einstein zwar vorhersagte, aber für nicht messbar hielt. In der Europäischen Organisation für Kernforschung CERN in Genf

wurde das für das Verständnis von Materie und Universum fundamentale Higgs-Boson nachgewiesen – in einem Teilchenbeschleuniger mit 27 km Durchmesser, das „größte Messinstrument der Welt“. Für diese Arbeiten gab es 2017 und 2013 Nobelpreise. Diese beiden Beispiele zeigen, zu welchen Extremen Menschen heute Messtechnik treiben können. Neben den unglaublichen Fortschritten in den zugrundeliegenden Technologien waren aber international koordinierte Zusammenarbeit und Finanzierung wesentlicher Schlüssel zum Erfolg.

Wissenschaft und Forschung beflügeln den Fortschritt in der Messtechnik, sie treiben internationale Zusammenarbeit und Standardisierung an und sind gleichzeitig wichtiger Kunde für die Branche – sie ist deshalb unverzichtbar und in vielerlei Hinsicht förderungswürdig.

Für die Messtechnik-Hersteller und den Maschinenbau ist die angewandte Forschung und dort die Produktionsforschung besonders wichtig: Die effiziente Steuerung zunehmend komplexer und gleichzeitig flexibler Produktionsabläufe erfordert eine in Echtzeit aktualisierte, detaillierte Kenntnis der Prozessparameter einerseits und logistischer Information andererseits. Die Vielzahl der dazu erforderlichen Sensoren und Messgeräte muss vor allem verlässliche, genaue Messdaten liefern, valide Informationen über dynamische Kalibrierzyklen zur Verfügung stellen und auf der Basis standardisierter Protokolle für vollständige Messdaten verlässlich kommunizieren. Dies alles stellt stark wachsende Anforderungen an die Metrologie dar und braucht die Zusammenarbeit mit der Forschung.

Messgerätezulassungen, Eichungen, Kalibrierungen und die dazu notwendigen – teilweise hoheitlichen – Prozesse müssen daher zunehmend automatisiert und digitalisiert werden, wozu die PTB beispielsweise mit der Entwicklung eines digitalen Kalibrierscheines, mit digitalen Zwillingen von Messgeräten, mit der Verifizierung digi-

taler Algorithmen in Messgeräten und der Entwicklung einer „Metrology Cloud“ massiv auch forschend beiträgt.

Die Entwicklung der Metrology Cloud, einer koordinierten, digitalen Qualitätsinfrastruktur für innovative Produkte und Dienstleistungen, wird die digitale Weiterentwicklung der gesetzlichen Metrologie voranzubringen. Ihr Fundament bildet eine vertrauenswürdige Metrologie-Plattform, die dafür gedacht ist, gesetzliche Verfahren durch das Anknüpfen an bestehende Infrastrukturen und Datenbanken zu unterstützen und zu vereinfachen und um eine zentrale Anlaufstelle für alle Interessenten bereitzustellen. Entsprechend ihrer spezifischen staatlichen Beauftragung stellt die PTB eine international akzeptierte und zuverlässige messtechnische Infrastruktur für Gesellschaft, Wirtschaft und Handel sowie für die Wissenschaft und Forschung gleichermaßen bereit. Auch hier gilt: Internationale Zusammenarbeit ist Trumpf, weltweit einheitliche Standards sind erstrebenswert, wie auch unsere Szenarien zeigen.

### Politik und Metrologie-Institutionen

Die Richtigkeit und Verlässlichkeit von Messungen im amtlichen und geschäftlichen Verkehr wie auch in Wissenschaft und Technik muss für eine moderne Industrie- und Wissensgesellschaft auch in Zukunft sichergestellt sein. Jedes am Welthandel teilnehmende Land unterhält deshalb eine nationale Qualitätsinfrastruktur, an deren Spitze üblicherweise ein nationales Metrologieinstitut steht. In der Bundesrepublik Deutschland ist dies die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), eine Bundesoberbehörde mit wissenschaftlich-technischen Dienstleistungsaufgaben im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.

Um den aktuellen und zukünftigen wissenschaftlichen und technologischen Anforderungen für die Bearbeitung der Aufgaben auf höchstem metrologischem Niveau gerecht zu werden,

muss die PTB entsprechend finanziell und personell ausgestattet sein. Die PTB betreibt in großem Umfang eigene Forschung und Entwicklung (FuE), oft zusammen mit Wirtschaftsverbänden, Universitäten und Forschungsinstitutionen sowie mit anderen Metrologieinstituten, insbesondere in Europa. Die Ergebnisse dieser gezielten FuE-Arbeiten münden in die Entwicklung neuer metrologischer Dienstleistungen. Die Innovationsfähigkeit der deutschen Industrie muss durch den Wissens- und Technologietransfer der PTB unterstützt werden.

Die Schwerpunktsetzung sollte in den Bereichen Digitalisierung, Energiewende, Biomedizin sowie Quanten- und Nanotechnologien erfolgen. Hier und in anderen Bereichen können sich daraus innovative Messverfahren entwickeln und neue Kalibrierdienstleistungen bereitgestellt werden. Die Arbeit der PTB bildet damit die Grundlage dafür, dass Verbraucher, Unternehmen oder Behörden gleichermaßen Vertrauen in die Zuverlässigkeit und Unparteilichkeit von Messungen und Prüfungen haben können.

### VDMA-Engagement

Im VDMA sind sowohl die Hersteller von Mess- und Prüftechnik als auch alle Anwendungsbereiche des Maschinen- und Anlagenbaus vertreten, nicht nur aus der Produktionstechnik, sondern auch in den Bereichen Mobile Maschinen für Landwirtschaft und Bauwesen, der Energie- und Medizintechnik bis hin zu Schwermaschinen und zum Großanlagenbau. Mess- und Prüftechnik geht alle an. Deshalb waren auch eine Vielzahl von VDMA Fachzweigen direkt oder indirekt in diese Studie involviert: Neben dem Hauptpartner VDMA Mess- und Prüftechnik waren dies die Bereiche Elektrische Automation, Laser, Forum Photonik, Industrielle Bildverarbeitung,

Organische und gedruckte Elektronik (OE-A), Textilmaschinen, Kunststoff- und Gummimaschinen, Antriebs- und Fluidtechnik, Electronics, Micro- and New Energy Technologies, Normenausschuss Maschinenbau, Forum Glastechnik, Kompressoren, Druckluft, Vakuum sowie Holzmaschinenbau.

Der VDMA hat die Notwendigkeit zur Digitalisierung und Transformation in Richtung „Industrie 4.0“ als Entwicklungstrends für eine innovative und damit auch künftig wettbewerbsfähige Industrie sowohl national auch als international früh erkannt. Bereits die erste Zukunftsstudie von VDMA Future Business setzte sich mit Künstlicher Intelligenz und Machine Learning auseinander, aus der eine eigene Expertengruppe beim Fachverband Software und Digitalisierung hervorging. Auch die Gründung von VDMA Startup-Machine hatte ihren Ursprung in der Notwendigkeit, solche Trends schnell umsetzen zu können.

Mit der Definition einer einheitlichen Schnittstelle für die horizontale Maschine-to-Machine-Communication oder der vertikalen Kommunikation zu übergeordneten Steuerungsebenen (z. B. Manufacturing Execution Systems MES) auf der Basis von OPC UA<sup>1</sup> hat der VDMA die Grundlage für eine international anschlussfähige Plug-and-Work-Lösung gelegt. Expertengruppen erarbeiten Companion Specifications für verschiedene Maschinen und Use Cases. So erstellt der VDMA in Abstimmung mit der OPC Foundation praktische Hilfestellungen für den Maschinen- und Anlagenbau, damit die zukünftigen Herausforderungen für die Digitalisierung in der Branche möglichst pragmatisch umgesetzt werden können.

<sup>1</sup> OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) ist eine Sammlung von Standards für den Datenaustausch in der Industrieautomation, mit der Fähigkeit, Maschinendaten (Regelgrößen, Messwerte, Parameter usw.) nicht nur

zu transportieren, sondern auch maschinenlesbar semantisch zu beschreiben.

Zum Thema Datensicherheit hat der VDMA ein eigenes Competence Center Industrial Security, das das Thema umfassend abdeckt mit Leitfäden, Studien, Arbeitskreisen, von Ransomware bis Produktpiraterie.

Low-Cost-Sensorik und Ubiquitous Sensing wird von der VDMA AG Organische und gedruckte Elektronik (OE-A) adressiert für verschiedenste Anwendungsfelder wie Automobil, Healthcare, Smart Buildings oder das Internet of Things. Die regelmäßig aktualisierte OE-A Roadmap stellt eine wichtige Entscheidungshilfe für die Umsetzung von Forschungsvorhaben und Produktplanung in der Industrie dar und unterstützt internationale Standardisierungsaktivitäten.

Die Studie hat gezeigt, dass die Quantentechnologie und die Biologie noch großes Potenzial bieten – wir sind deshalb gerade dabei, diese Themen weiter auszubauen. Der Bereich Quantentechnologien wird heute bereits im VDMA Forum Photonik betreut. Der VDMA will für das Thema „Quantentechnologien der zweiten Generation“ eine neue Themenplattform aufbauen. Als erster Schritt ist ein Workshop für VDMA-Mitglieder geplant, in welchem Potentiale und mögliche Anwendungsgebiete von Quantensensoren, Quantencomputern und verwandten Technologien aufgezeigt werden sollen. Jenseits von den in dieser Studie betrachteten bio- und chemiebasierten Sensoren hat die Biologie das Potenzial, die Industrie in eine weitere Welle des Wandels zu führen, der „Biologischen Transformation“, die eine ähnliche Wucht für die Industrie entwickeln könnte, wie die Digitale Transformation. „Biologisierung der Industrie“ wird deshalb das Thema unserer nächsten Zukunftsstudie sein.

Fazit: Der VDMA bringt die unterschiedlichen Beteiligten zusammen, damit deren Geschäftsmodelle eine Zukunft in der Mess- und Prüftechnik haben. Die themenunabhängige Vorbereitung auf Wandel und Disruption ist die Verankerung von Foresight und „Preparedness“ als Unternehmensstrategie. Dies adressieren wir für die Mitglieder mit VDMA Corporate Foresight, einer Expertengruppe bei VDMA Future Business.

# Methodik und Beteiligte

Strategische Entscheidungen werden auf der Basis von Zukunftserwartungen und -vorstellungen getroffen. Wie die Zukunft tatsächlich aussieht, ist offen. Die Entwicklung alternativer Zukunftsvorstellungen hilft aber, handlungsfähig zu werden. Eine aktive Auseinandersetzung mit möglichen sowie erwünschten zukünftigen Entwicklungen stärkt die Wissensbasis der Entscheidungsträger.

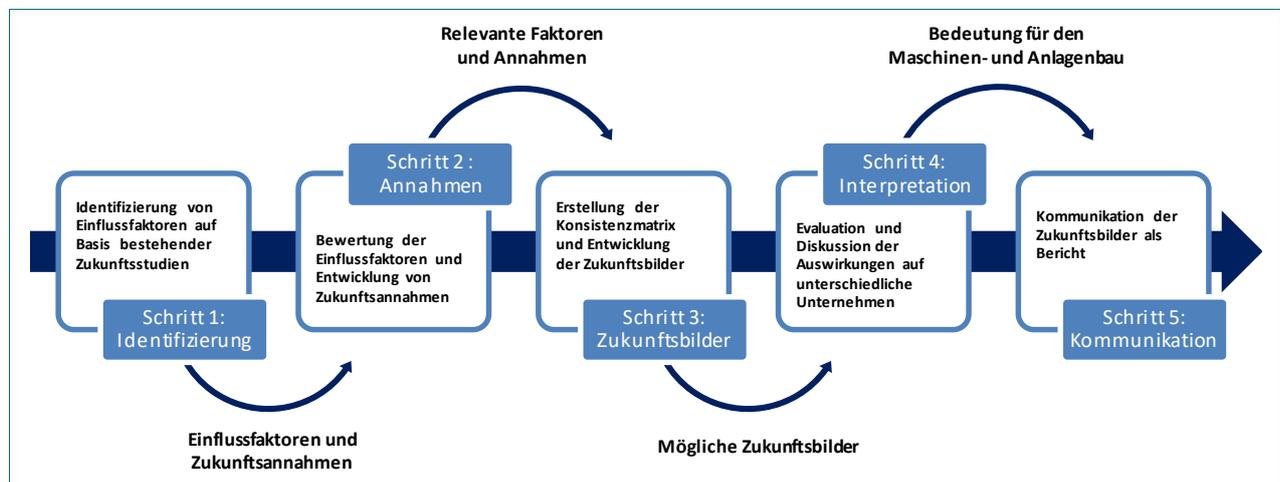
Die im Rahmen unseres Future-Business-Prozesses entwickelten Zukunftsbilder zeichnen sich dadurch aus, dass sie methodisch nachvollziehbar generiert wurden, auf einer transparenten Dokumentation der Annahmen basieren und die relevanten Akteure in den gesamten Prozess umfangreich eingebunden wurden. Die Zukunftsbilder wurden darauf ausgerichtet, Gestaltungsoptionen auszuloten und robuste Handlungsstrategien zu entwickeln.

Auf folgende Aspekte wurde Wert gelegt:

- Expertenwissen als Ausgangsbasis
- Integration verschiedener Perspektiven zur „kollektiven Intelligenz“

- passgenaue Ausrichtung des gewählten Szenario-Ansatzes auf die Problemstellung und die Randbedingungen der Branche
- strukturiertes Vorgehen, festgelegte Methodik, in sich konsistente Szenarien, unterstützt durch Software
- Einsatz kreativer Elemente, die ein Ausbrechen aus eingeschliffenen Denkmustern ermöglichen
- Einbindung relevanter Firmen, Forscher, VDMA-Experten und der Fraunhofer-Gesellschaft.

Die Abbildung zeigt die unterschiedlichen Schritte, die wir unternommen haben. Die so entstandenen Zukunftsbilder erheben nicht den Anspruch, dass eines von ihnen genau so eintritt. Anders als bei anderen Prognosen sind die zugrundeliegenden Annahmen aber transparent. Sie lassen sich hinterfragen, ändern und gegebenenfalls anpassen und sind so ein Mittel für alle Player, Rückschlüsse auf ihr eigenes Geschäft zu ziehen, geeignete Strategien zu entwickeln und damit vorbereitet auf den Wandel zu sein.



So haben wir die Zukunftsbilder entwickelt: Die Schritte 1 und 2 sowie der Schritt 4 erfolgte in Workshops von VDMA Future Business in Zusammenarbeit mit Firmen, Forschern, VDMA-Experten und der Fraunhofer-Gesellschaft. Quelle: Fraunhofer ISI

# Anhang

## Weiterführende Literatur

### Mess- und Prüftechnik – Allgemeines und Grundlagen

- Leòn, Fernando Puente (2019): Messtechnik, Grundlagen, Methoden und Anwendungen, Springer Verlag. [Systematische Einführung in die moderne Messtechnik.](#)
- Hoffmann, Jörg (2021): Handbuch der Messtechnik, Carl Hanser Verlag. [Umfassendes Nachschlagewerk zum Gesamtgebiet der elektrischen und nichtelektrischen Messtechnik.](#)
- Felderhoff, Rainer; Freyer, Ulrich (2015): Elektrische und elektronische Messtechnik. Grundlagen, Verfahren, Geräte und Systeme: Carl Hanser Verlag. [Messverfahren für verschiedene elektrische und nichtelektrische Größen.](#)
- Hofmann, Dietrich (2013): Handbuch Messtechnik und Qualitätssicherung: Springer-Verlag. [Grundlagen der Messtechnik und Qualitätssicherung.](#)
- Imkamp, Dietrich; Berthold, Jürgen; Heizmann, Michael; et al. (2016): Challenges and trends in manufacturing measurement technology. The "Industrie 4.0" concept. In: Journal of Sensors and Sensor systems 5 (2), S. 325. [Zukunftsausblick der Fertigungsmesstechnik.](#)
- Warnecke, H. J., Dutsche W. (1984): Fertigungsmesstechnik, Handbuch für Industrie und Wissenschaft, Springer. [Grundlagen der Fertigungsmesstechnik.](#)
- Keferstein, Claus P.; Marxer, Michael; Bach, Carlo (2017): Fertigungsmesstechnik: Alles zu Messunsicherheit, konventioneller Messtechnik und Multisensorik, Springer Fachmedien, Wiesbaden. [Entwicklung, Bedeutung und Zusammenhänge von Mess- und Prüfverfahren für industriell hergestellte Produkte.](#)
- Mohns, Enrico; Räther, Peter (2017): Prüftechnik und deren Einfluss bei der Kalibrierung von Messwandlern. In: tm-Technisches Messen 84 (2), S. 91–100. [Definition und Ursachen von Messabweichungen von Messwandlern, Kalibrierung.](#)
- Physikalisch-Technische Bundesanstalt (2020): Das neue Internationale Einheitensystem (SI). Online: [https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/presse\\_aktuelles/broschueren/intern\\_einheitensystem/Das\\_neue\\_Internationale\\_Einheitensystem.pdf](https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/presse_aktuelles/broschueren/intern_einheitensystem/Das_neue_Internationale_Einheitensystem.pdf) [Einführung in die fundamentale Bedeutung des neuen SI für Wirtschaft, Gesellschaft und Wissenschaft.](#)
- Physikalisch-Technische Bundesanstalt PTB, Braunschweig (2020): PTB-Jahresbericht 2019 [Überblick über aktuelle Forschungsarbeiten an der PTB.](#)
- VDMA Mess- und Prüftechnik (2019): Das Branchen-Netzwerk, Mitglieder und Produkte [Vorstellung des Fachverbandes Mess- und Prüftechnik im VDMA | https://mup.vdma.org](https://mup.vdma.org)

### Mess- und Prüftechnik – Beispiele und Verschiebung innerhalb der Wertschöpfungskette

- Irle, Matthias; Dlugosch, Georg (Ed.): Mess- und Prüftechnik im Produktionsprozess. Future Manufacturing, Magazin für intelligente Produktion, Band 3, 2020. VDMA Verlag GmbH, Frankfurt. [Moderne Mess- und Prüftechnik im Produktionsprozess, mit zahlreichen Beispielen.](#)
- Dietrich, Edgar; Schulze, Alfred (2017): Eignungsnachweis von Prüfprozessen, Carl Hanser Verlag. [Orientierung und Hilfestellung zu Forderungen aus der Automobilindustrie für die industrielle Produktion.](#)
- Qualitäts Management Center im Verband der Automobilindustrie VDA-QMC (Hrsg.): VDA Band 5 (2011): Prüfprozesseignung. [Verfahren zur Beurteilung und Abnahme von Messeinrichtungen, Hinweise zur Validierung von Messsoftware.](#)

- Beyerer, Jürgen; Hanke, Randolf: Modern Non-Destructive Testing. In: tm-Technisches Messen 87 (2020), Nr.6, S.381-382. DOI: 10.1515/teme-2020-0033.  
Moderne zerstörungsfreie Prüfung: Gewinnung von Informationen und weitere Verknüpfung mit Prozesswissen für den gesamten Material- und Produktlebenszyklus in der Wertschöpfungskette, Kreislaufwirtschaft.
- Muangprathub, Jirapond et al. (2019): IoT and agriculture data analysis for smart farm. In: Computers and electronics in agriculture 156, S. 467–474.  
Messtechnik in der Landwirtschaft.
- Grunert, Jens-Holger (2019): Strahlenschutz für Röntgendiagnostik und Computertomografie. Springer-Verlag.  
Messtechnik in der Medizin.
- Dietrich, Edgar; Conrad, Stephan (2014): Eignungsnachweis von Messsystemen (Pocket Guide), Carl Hanser Verlag.  
Erläuterung von Abnahme und Beurteilung von Messsystemen.

#### Standardisierung für die Mess- und Prüftechnik

- Bachmaier, H., Ulbig, P. (2014): Organisation des Messwesens in Deutschland, in: Pfeifer, T., Schmitt, R. (Hrsg.): Masing Handbuch Qualitätsmanagement, Carl Hanser Verlag. ISBN 978-3-446-43431-8.  
Regeln für das gesetzliche und industrielle Messwesen in Deutschland.
- VDMA-Einheitsblatt 8720: 2020-09 (Entwurf): Leitfaden zur Klärung der Eigenschaften, Anforderungen und Abnahme von Messsystemen und Messprozessen. | <https://mup.vdma.org/viewer/-/v2article/render/49970300>  
Klärung der Eigenschaften, Anforderungen und Abnahme der geeigneten Messsysteme und Messprozesse unter gegebenen Prozessbedingungen.
- Krush, Dmytro; Cammin, Christoph; Heynicke, Ralf; Scholl, Gerd (2016): Standardisierung eines schnellen drahtlosen Sensor/Aktor-Netzwerkes für die Fertigungsautomatisierung. In: tm-Technisches Messen 83 (4), S. 201–207.  
Herausforderungen in der Fertigungsautomatisierung im Zusammenhang mit der Sensor-/Aktor-Kommunikation.
- VDI/VDE-Ges. Mess- und Automatisierungstechnik (Hrsg.): VDI/VDE/DGQ 2618 Blatt 1.1 :2001-12, Prüfmittelüberwachung, Anweisungen zur Überwachung von Messmitteln für geometrische Größen, Grundlagen, Beuth-Verlag.  
Richtlinie zur Prüfung von Messmitteln für geometrische Messgrößen. Zeigt, wie Kennwerte zur Bewertung von Messergebnissen ermittelt werden können.

#### Kostenfaktoren und Kostensenkungspotenziale

- Metten, Beate; Binzer, Judith; Fleischer, Jürgen; et al. (2018): Leitfaden Sensorik für Industrie 4.0 – Wege zu kostengünstigen Sensorsystemen. VDMA Forum Industrie 4.0.  
Unterstützung von Anwendern und Herstellern von Sensorsystemen bei der Definition der Anforderungen und der Entwicklung kostengünstiger Sensorsystemen.
- Ehrlenspiel, Klaus; Kiewert, Alfons; Lindemann, Udo: (2005): Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung (VDI-Buch), Springer-Verlag.  
Standardwerk; bietet gesicherte Methoden zur Kostenerfassung, Kostenbeeinflussung und Kostensenkung und beschreibt Methodik und Organisation des Kostenmanagements.
- Lorenzoni, Anselm; Tieleman, Christopher; Sauer, Alexander (2019): Reducing manufacturing costs. The dynamic tolerance system. In: Cogent Engineering 6 (1). DOI: 10.1080/23311916.2019.1618517.  
Reduktion von Fertigungskosten.
- Shaikh, Faisal Karim; Zeadally, Sherali (2016): Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 55, S. 1041–1054.  
Energiegewinnung in drahtlosen Sensornetzen.

### Drahtlose Vernetzung von Sensoren und Messsystem

- Heister, Reinhard; Loidl, Karin; et al. (2020): 5G im Maschinen- und Anlagenbau. VDMA Elektrische Automation. Leitfaden für die Integration von 5G in Produkt und Produktion in zukünftig hochgradig vernetzten Systemen mit Integration von kollaborativen Robotern, Augmented Reality, Internet der Dinge, Massendatenanalyse, künstlicher Intelligenz und energieeffizienten Prozessen.
- Use Cases zum Leitfaden 5G im Maschinenbau: <https://ea.vdma.org/viewer/-/v2article/render/47636048>  
Praxisorientiertes Instrument zu 5G Anwendungen.
- Kocakulak, Mustafa; Butun, Ismail (2017): An Overview of Wireless Sensor Networks Towards Internet of Things. In: Satyajit Chakrabarti (Hg.): IEEE CCWC - 2017. 2017 IEEE 7th Annual Computing and Communication Workshop and Conference : 09-11 January, 2017, Las Vegas, USA. Piscataway, NJ: IEEE, S. 1–6.  
Übersicht zu Arten von drahtlosen Sensor-Netzwerken für Anwendungen im Internet of Things.
- Schütze, Andreas; Helwig, Nikolai; Schneider, Tizian (2018): Sensors 4.0. Smart sensors and measurement technology enable Industry 4.0. In: Journal of Sensors and Sensor systems 7 (1), S. 359–371.  
Intelligente Sensorik und Messtechnik ermöglichen Industrie 4.0.
- Friedrich, Juliane (2017): Narrowband IoT als neuer Impulsgeber für Industrie 4.0. VDMA Fördertechnik und Intra-logistik. <https://foerd.vdma.org/viewer/-/v2article/render/22346425>  
Energiesparende Alternative zu Mobilfunknetzen, DSL, WLAN oder Bluetooth in der M2M-Kommunikation

### Digitalisierung in der Mess- und Prüftechnik

- Pfeifer, Tilo; Imkamp, Dietrich (2004): Koordinatenmesstechnik und CAX-Anwendungen in der Produktion – Grundlagen, Schnittstellen, Integration, Carl Hanser Verlag, München.  
Rechnergestützte Verknüpfung von Fertigungsmesstechnik und Produktion.
- Eichstädt, Sascha (2018): Metrologie für die Digitalisierung von Wirtschaft und Gesellschaft. Die PTB-Digitalisierungsstrategie (Stand 2018). Online: [https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/forschung\\_entwicklung/digitalisierung/PTB-Digitalisierungsstudie\\_2018.pdf](https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/forschung_entwicklung/digitalisierung/PTB-Digitalisierungsstudie_2018.pdf)  
Übersicht zu Kernthemen einer umfassenden Digitalisierung in der Messtechnik, die von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) proaktiv verfolgt werden.
- Heizmann, Michael; Sommer, Klaus-Dieter (2019): Expertenforum Trends in der industriellen Mess- und Automatisierungstechnik. Von der Messung zur Information. In: tm-Technisches Messen 86 (11), S. 619–622.  
Auswirkungen auf die Mess- und Automatisierungstechnik durch die Fortschritte in der Informations- und Kommunikationstechnik.
- Brown, C.; et al. (2020): Infrastructure for Digital Calibration Certificates, 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT, Roma, Italy, 2020, pp. 485-489,  
DOI: 10.1109/MetroInd4.0IoT48571.2020.9138220.  
Bewertung der aktuellen nationalen und europäischen Entwicklung zum Digitalen Kalibrierschein hinsichtlich günstigen Anpassungen in der Qualitätsinfrastruktur.
- Thiel, F.; et al. (2018): A Digital Quality Infrastructure for Europe: The European Metrology Cloud.  
DOI: 10.7795/310.20170404.  
Umfangreiche Einführung zu den Konzepten der European Metrology Cloud.
- Mosch, Christian; Pethig, Florian; et al. (2017): Industrie 4.0 – Kommunikation mit OPC UA, Leitfaden zur Einführung in den Mittelstand. VDMA Verlag GmbH. VDMA Forum Industrie 4.0 | <https://opcua.vdma.org/>  
Grundlagen zu OPC-UA, zum standardisierten und durchgängigen Austausch von Informationen über alle Schichten der Automatisierungssysteme hinweg. Studie in Zusammenarbeit mit Fraunhofer-IOSB-INA.

### Datensicherheit, Datenhoheit, Bereitschaft zum Teilen von Daten, Datenhandel

- Zimmermann, Steffen; et al. (2019): Status Quo der Industrial Security im Maschinen- und Anlagenbau, Ergebnisse der Umfrage, Maßnahmen und Handlungsempfehlungen. VDMA Industrial Security Das VDMA Competence Center Industrial Security deckt das Thema umfassend ab mit Leitfäden, Studien, Arbeitskreisen, Angeboten von Ransomware bis Produktpiraterie. <https://industrialsecurity.vdma.org>
- Frustaci, M., Pace, P., Aloj, G., & Fortino, G. (2018). Evaluating critical security issues of the IoT world: Present and future challenges. In: IEEE Internet of things journal, 5 (4), 2483-2495.  
Umfangreiche Aufarbeitung von Herausforderungen zur Datensicherheit im IoT auf den drei Ebenen Datengenerierung, -übertragung und -auswertung.
- Diemer, Johannes (2017): „Sichere Industrie-4.0-Plattformen auf Basis von Community-Clouds“, In: Handbuch Industrie 4.0, Vogel-Heuser, Birgit; Bauernhansl, Thomas; ten Hompel, Michael (Hrsg.), Bd. 1. Springer, S. 177-204. Konzeption und prototypische Realisierung einer föderalen und zugleich hochsicheren IKT-Plattform für die Zusammenarbeit in horizontalen Wertschöpfungsnetzwerken (Forschungsinitiative Virtual Fort Knox). <https://www.ipa.fraunhofer.de/de/referenzprojekte/virtual-fort-knox.html>
- Perens, Bruce (2005): The emerging economic paradigm of Open Source. First Monday. DOI:10.5210/FM.V0I0.1470  
Grundsatzpapier über den wirtschaftlichen Erfolg von Open Source Software: Teilen lohnt sich.
- Lutterbeck, Bernd; Bärwolff, Matthias; Gehring, Robert A. (Hrsg.): Open Source Jahrbuch 2008. Zwischen freier Software und Gesellschaftsmodell, Berlin: Lehmanns Media, 2008, <http://www.opensourcejahrbuch.de/>  
Das bedeutendste Kompendium zu Open Source im deutschsprachigen Raum. Ökonomie, Politik, Soziologie sowie rechtliche Aspekte von Open Source in 5 Bänden. Weitergeführt in Englisch unter <https://opensource.com>
- Wikipedia-Portal Freie Software: [https://de.wikipedia.org/wiki/Portal:Freie\\_Software/Literatur](https://de.wikipedia.org/wiki/Portal:Freie_Software/Literatur)  
Umfassende Bibliographie insbesondere um Akzeptanz, rechtliche und soziale Aspekte von Open-Source-Software.
- Infotag „Chancen und Nutzen von Open-Source-Software im Maschinenbau“ (2017)  
<https://www.vdma.org/v2viewer/-/v2article/render/16496040>  
VDMA Software und Digitalisierung / VDMA Robotik und Automation: Infotage zu Open Source (Mit Download)
- Rauen, Hartmut; Zollenkop, Michael; et al.(2018): Plattformökonomie im Maschinen- und Anlagenbau – Herausforderungen, Chancen und Handlungsoptionen. Roland Berger. Erhältlich unter <https://industrie40.vdma.org>  
Erste umfassende Analyse der Strukturen plattformbasierter Geschäftsmodelle im B2B-Segment und speziell im Maschinen- und Anlagenbau, Leitfaden.

### Modellierung und Simulation, Virtualisierung

- Fortuna, Luigi.; Graziani, Salvatore; Rizzo, A.; Xibilia, Maria G. (2006): Soft Sensor for Monitoring and Control of Industrial Processes. Springer-Verlag, London  
Grundlagen zu virtuellen Sensoren (Soft Sensor, Sensorfusion): Design, Modelle, Fehlererkennung, industrielle Anwendungen
- Schmitt, Robert; Koerfer, Friedel; et al.: Virtuelle Messgeräte: Definition und Stand der Entwicklung. In: tm - Technisches Messen, Oldenbourg Industrieverlag, 75 (2008) 5 S. 298-310. DOI 10.1524/teme.2008.0872.  
Übersicht zu virtuellen Messgeräten, Simulationen und Messunsicherheitsermittlung am Beispiel Nanostrukturen.
- Jin, Xiaoning; Shui, Huanyi; Shpitalni, Moshe (2019): Virtual sensing and virtual metrology for spatial error monitoring of roll-to-roll manufacturing systems. In: CIRP Annals 68 (1), S. 491–494.  
Virtuelle Messtechnik für die effektive Prozessüberwachung, Fehlererkennung und -diagnose mit begrenzten physischen In-situ-Sensoren am Beispiel von Rolle-zu-Rolle-Druck von Organischer Elektronik oder Biosensoren.

- Ballu, A.; Yan, X.; Blanchard, A.; Clet, T.; Mouton, S.; Niandou, H. (2016): Virtual metrology laboratory for e-learning. In: Procedia CIRP 43, S. 148–153.  
Virtuelle Messsimulationen für e-Learning Aktivitäten.
- VDMA Verlag GmbH (2018): Wege zum Digitalen Zwilling, Simulation und Visualisierung im Produktlebenszyklus. 15 Anwenderbeispiele des VDMA-Arbeitskreises „Simulation und Visualisierung im Produktlebenszyklus“, s. auch <https://informatik.vdma.org> | <https://www.vdma.org/v2viewer/-/v2article/render/18237460>

### Neue Messmethoden und Wirkprinzipien

- Swager, Timothy M. (2018) Sensortechnologien durch neuartige Materialien und Moleküle. In: Angewandte Chemie, 130, 4325-4335. DOI: 10.1002/ange.201711611  
Überblick über Entwicklungen bei chemischen und bio-basierten Sensoren mit Anwendungsbezug und Herausforderungen für die Praxis.
- Kassal, Petar; Steinberg, Matthew D.; Murković Ivana (2018): Wireless chemical sensors and biosensors: A review. In: Sensors and Actuators B: Chemical, 266, 228-245. DOI: 10.1016/j.snb.2018.03.074  
Ausführliche Review und Aufarbeitung der wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu chemischen und bio-basierten Funksensoren des vergangenen Jahrzehnts.
- Bauernhansl, Thomas; et al. (2018): Biointelligenz – Eine neue Perspektive für nachhaltige industrielle Wertschöpfung. Fraunhofer-Verlag.  
Biologie als neue Welle der Transformation für die Industrie. Aktueller Stand, Potenziale, Bedarfe, Hemmnisse sowie drei mögliche Entwicklungspfade für Deutschland im Kontext von Produktionssystemen im Zeithorizont 2035.
- Organic and Printed Electronics Association (2020): Smart Objects and Sensors. In: OE-A Roadmap for Organic and Printed Electronics 8th Edition, S. 64-69. ISBN: 978-3-8163-0736-5  
Ubiquitous Sensing mit gedruckten Low-Cost-Sensoren. Siehe auch <https://www.oe-a.org>

### Disruption, insbesondere durch Coronavirus-Pandemie

- Falk, Svenja; et al. (2020): Zehn Thesen zur Zukunft digitaler Geschäftsmodelle für Industrie 4.0 in der Post-Corona-Ökonomie. Plattform Industrie 4.0. erhältlich unter <https://www.plattform-i40.de>  
Zehn Thesen zu digitalen Geschäftsmodellen für die Zeit nach der Corona-Krise, AG 6 „Digitale Geschäftsmodelle“.
- Wiechers, Ralph; Steinwachs, Thomas (2020): This Time Is Different, Again. In: ifo Schnelldienst, 73/2020, Nr. 05, S. 23-26, ifo Institut, München.  
Lieferketten in und nach der Corona-Krise, (De-)Globalisierung, Auswirkungen auf den Maschinenbau.
- Rosling, Hans; et al. (2017). Factfulness: Wie wir lernen, die Welt so zu sehen, wie sie wirklich ist. Ullstein, Berlin.  
Messtechnik, Statistik und Perzeption: 10 Regeln für die objektive Einschätzung von Daten, mit anschaulichen Beispielen aus Demographie und der Ebola-Epidemie. Datenpool und Werkzeuge unter <https://www.gapminder.org/>

### Quantentechnologie, inkl. Quantenmetrologie und Quantenkryptographie

- Kagermann, H.; Süssenguth, F.; Körner, J.; Liepold, A. (2020): Innovationspotenziale der Quantentechnologien der zweiten Generation. acatech IMPULS, München.  
Die wichtigsten wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Entwicklungen im Bereich der Quantentechnologien der zweiten Generation. Überblick über Innovationspotenziale und Herausforderungen am Standort Deutschland.

- Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2018): Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt. BMBF Referat Quantentechnologien; Photonik. <https://www.quantentechnologien.de>  
Einführung aller Aspekte von Quantentechnologien im Rahmen der High-Tech-Strategie der Bundesregierung.
- VDI Technologiezentrum (2017): Förderung von Quantentechnologien  
Positionspapier der deutschen Industrie
- VDMA Forum Photonik: Basisinformationen über Quantentechnologien | <https://photonik.vdma.org>  
Grundlegende Informationen rund um das Thema Quantentechnologien der zweiten Generation sowie zu den entsprechenden Fördermaßnahmen, mit hilfreichen Links.
- Laurenza, Riccardo; Lupo, Cosmo; Spedalieri, Gaetana; Braunstein, Samuel L.; Pirandola, Stefano (2018): Channel simulation in quantum metrology. In: Quantum Measurements and Quantum Metrology 5 (1), S. 1–12.  
Quantenmessungen und Quantenmetrologie.
- Sekatski, Pavel; Skotiniotis, Michalis; Kołodyński, Janek; Dür, Wolfgang (2017): Quantum metrology with full and fast quantum control. In: Quantum 1, S. 27.  
Ermittlung der Genauigkeit von Parametern mit Hilfe einer vollständigen und schnellen Quantenkontrolle.

#### Arbeit 4.0, Verfügbarkeit von Fachkräften

- Wörheide, Ralph Jan (2019): Was hat Prüftechnik mit Fachkräftemangel zu tun? In: JOT Journal für Oberflächentechnik 59 (5), S. 41–43.  
Automatisierung von Mess- und Prüfsystemen zur Entlastung von Fachkräften.
- Seus, Fabian; et al. (2017): Wie arbeiten wir in der Zukunft? Die betriebliche Praxis zwischen Vision und Gegenwart. VDMA Competence Center Arbeit 4.0 | <https://www.allesbleibt-anders.net>  
Impulse und Hilfestellung für die betriebliche Gestaltung der Zukunft der Arbeit. Mit zahlreichen Praxisbeispielen aus den Bereichen Bildung, Führung, Agilität, Arbeitsrecht sowie der Mensch-Maschine-Kollaboration.
- Haase, Tina; Termath, Wilhelm; Schumann, Marco (2015): Integrierte Lern- und Assistenzsysteme für die Produktion von. In: Lehren und Lernen für die moderne Arbeitswelt. Berlin: Gito, S. 183–207.  
Industrie 4.0 und resultierende Veränderungen für die Arbeitssysteme und für die Mitarbeiter.
- Stewart, Fran & Kelley, Kathryn (2019): Connecting Hands and Heads: Retooling Engineering Technology for the “Smart” Manufacturing Workplace. In: Economic Development Quarterly, 34 (1), 31-45. Doi: 10.1177/0891242419892055  
Analyse zu veränderten Skill-Anforderungen an Fachkräfte im Maschinenbau durch Entwicklungen hin zur integrierten Smart-Factory.
- Lai, Ze-Hao; Tao, Wenjin; Leu, Ming C.; Yin, Zhaozheng (2020) Smart augmented reality instructional system for mechanical assembly towards worker-centered intelligent manufacturing. In: Journal of Manufacturing Systems, 55, 69-81. Doi: 10.1016/j.jmsy.2020.02.010  
Unterstützung von Fachkräften durch Augmented Reality.
- Sickinger, Horst; et al. (2018): Erhebung des Lehrangebotes mit Bezug zu den Quantentechnologien an deutschen Hochschulen und hochschulnahen Forschungseinrichtungen. VDI Technologiezentrum GmbH.  
Umfassende Übersicht zu aktuellen Lehrangeboten zu Quantentechnologien der zweiten Generation.

### Methodik: Foresight und Szenariotechnik in Theorie und Praxis

- Gleich, Ronald; Schneider, Christoph; Tyssen, Matthias (2010): Zukunftsmanagement als Erfolgsfaktor für die Investitionsgüterindustrie. VDMA Stiftung IMPULS, Frankfurt. [http://www.impuls-stiftung.de/studien Foresight-Grundlagen zum Einstieg mit Zahlen und Fakten zur Anwendung im Maschinen- und Anlagenbau.](http://www.impuls-stiftung.de/studien/Foresight-Grundlagen_zum_Einstieg_mit_Zahlen_und_Fakten_zur_Anwendung_im_Maschinen-_und_Anlagenbau)
- Maiser, Eric (2020): Foresight in a Nutshell. Foliensatz für die Unternehmenspraxis. VDMA Future Business. <https://future.vdma.org/viewer/-/v2article/render/49725314>  
Vier Schritte zu Foresight und „Preparedness“: Unternehmensstrategie unabhängig von Themen und Trends.
- Maiser, Eric; Moller, Björn (2019): Trendradar für den Maschinen- und Anlagenbau. 2. Auflage. VDMA Future Business, Frankfurt. <https://future.vdma.org/viewer/-/v2article/render/35178592>  
Aktuelle maschinenbaurelevante Trends und Megatrends im Zeithorizont 5 bis 15 Jahre, übersichtlich aufbereitet als Trendkarten, Radar und Longlist mit Aufteilung in unterschiedliche Kategorien.
- Dönitz, Ewa J., and Schirmeister, Elna: "Foresight and Scenarios at Fraunhofer ISI", Problemy Eksploatacji, 2013. Beschreibung der Methodik des Fraunhofer ISI im Foresight- und Szenarioprozess.
- Dönitz, Ewa J. „Effizientere Szenariotechnik durch teilautomatische Generierung von Konsistenzmatrizen. Empirie, Konzeption, Fuzzy- und Neuro-Fuzzy-Ansätze“, Gabler, 2009. Grundlagen der Szenariotechnik, empirische Auswertung von Konsistenzmatrizen sowie Konzeption und Erprobung eines Werkzeugs zur teilautomatischen Ausfüllung von Konsistenzmatrizen.
- Fraunhofer ISI: "OBSERVE", Future and Emerging Technologies (FET) Programme of the European Commission. Fraunhofer, 2017, <https://www.horizon-observatory.eu/radar-en/>  
Das „OBSERVE“-Projekt ermittelt neue und visionäre Technologiefelder in einer Radarperspektive, um Europa bei der Positionierung im Technologiewettbewerb zu unterstützen. Beispiele für aktuelle Trends und Megatrends.
- BMBF Foresight-Zyklus II, <https://www.bmbf.de/de/mit-foresight-in-die-zukunft-schauen-930.html>  
Bericht mit 60 Gesellschaftstrends als Ausgangspunkt zur Formulierung von sieben zukünftigen gesellschaftlichen Herausforderungen für die Forschung und Innovationspolitik; 3 Bände u. a. mit „Geschichten aus der Zukunft“.
- Bartsch, Bernd, et al.: „Szenario 2030: Wie verändert China den Wirtschaftsstandort Deutschland?“, Bertelsmann Stiftung, 2015. Szenarioprozess, Einflussfaktoren und Korrelationsanalyse an einem populären Beispiel gezeigt.

## Teilnehmer der Workshops

Folgende Firmen und Organisationen haben an den beiden Szenario-Workshops von VDMA Future Business in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, CompetenceCenter Foresight, teilgenommen. Wir danken für die kreativen Ideen und die fruchtbaren Diskussionen!

Achenbach Buschhütten GmbH & Co. KG  
 Baumer Inspection GmbH  
 EMG Automation GmbH  
 Erichsen GmbH & Co. KG  
 Fraunhofer Allianz Vision  
 Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT  
 Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und  
 Mikointegration IZM  
 Isra Vision AG  
 Gefran Deutschland GmbH  
 Mahr GmbH  
 PAMAS Partikelmess- und Analysesysteme GmbH

Physikalisch-Technische Bundesanstalt PTB  
 Point 8 GmbH  
 RTE Aktustik + Prüftechnik GmbH  
 Schenck RoTec GmbH  
 Schmidt + Haensch GmbH & Co.  
 Trützschler GmbH & Co. KG  
 VDMA Elektrische Automation  
 VDMA Mess- und Prüftechnik  
 VDMA Photonik  
 VDMA Robotik + Automation  
 VDMA Textilmaschinen  
 Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH



Teilnehmer des zweiten Workshops „Progressive Mess- und Prüftechnik 2030“ in Frankfurt. Foto: VDMA.

## Impressum

### Herausgeber

VDMA Future Business  
Lyoner Str. 18  
60528 Frankfurt am Main  
Telefon +49 69 6603-1592  
E-Mail [future@vdma.org](mailto:future@vdma.org)  
Internet <https://future.vdma.org>

### Autoren

#### VDMA

Dr. Eric Maiser (Future Business)  
Hans-Günter Heil (Mess- und Prüftechnik)

#### Fraunhofer ISI

Ralph Gutknecht (Foresight)  
Dr. Björn Moller (Foresight)

#### Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)

Dr. Daniel Hutzschenreuter (Mechanik und Akustik)  
Dr. Sascha Eichstädt (Präsidentialer Stab)  
Dr.-Ing. Prof. h. c. Frank Härtig (Vizepräsident)

### Redaktion

Dr. Eric Maiser, Ralph Gutknecht

### Fachliche Unterstützung

Dr. Dietrich Imkamp (Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH), Dr. Moritz Förster (VDMA Forum Photonik, VDMA Laser und Lasersysteme für die Materialbearbeitung), Florian Löber (VDMA Elektrische Automation), Dr. Andreas Sobotka (Trützschler GmbH & Co. KG), Dr. Tobias Brambach (Point 8 GmbH), Stefan Röger (Impuls-Stiftung), Jan Krausmann (VDMA Organic and Printed Electronics Association OE-A), Dr. Laura Dorfer (VDMA Startup-Machine)

### Druck

h. reuffurth gmbh, Mühlheim am Main

### Copyright 2020

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt und Mitgliedern des VDMA vorbehalten.

### Bildnachweis

#### Titelbild

**Spiegel des Virgo Gravitationswellendetektors** – Nur hochpräzise, international digital vernetzte Messtechnik war in der Lage, mit Hilfe von Quanteneffekten eines der Rätsel des Universums aus Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie zu lösen (Nobelpreis für Physik 2017).

Zuschnitt aus „Mirror“ von M. Perciballi, EGO & Virgo Collaboration | [Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

S. 8, 10, 12

sdecoret | [stock.adobe.com](https://stock.adobe.com)

S. 8, 10, 17

Monopoly919 | [stock.adobe.com](https://stock.adobe.com)

S. 9, 10, 21

cooperr | [stock.adobe.com](https://stock.adobe.com)

S. 9, 10, 25

freedom\_naruk | [stock.adobe.com](https://stock.adobe.com)

Andere Bildquellen

siehe Bildunterschriften

## **VDMA**

Competence Center Future Business

Lyoner Straße 18

60528 Frankfurt am Main

Telefon +49 69 6603-1592

Fax +49 69 6603-2592

E-Mail [future@vdma.org](mailto:future@vdma.org)

Internet <https://future.vdma.org>

<https://future.vdma.org>