



PTB-Kompetenzzentrum

„Metrologie für virtuelle Messgeräte“  
(VirtMet)

Im Zuge der Digitalisierung nimmt die Bedeutung von Simulationen und *in silico* Experimenten rasant zu. In vielen Bereichen sind sog. „virtuelle Messungen“ als Simulationen auf Grundlage physikalisch-mathematischer Modellierung und statistischer Methoden inzwischen im alltäglichen Einsatz. So dienen beispielsweise Simulationen dazu, ein besseres Verständnis für das reale Experiment zu erhalten, neue Versuche zu planen oder bestehende Versuche auszuwerten. Inzwischen werden auch vermehrt Simulationen als essentieller Bestandteil der Messung verwendet, in der Regel als Bestandteil eines inversen Problems.

In dieser Entwicklung ist die Aufgabe der Metrologie die Sicherung von Vertrauen in Simulationsergebnisse, wenn diese in derselben Weise wie reale Messungen verwendet werden sollen. Konkrete existierende Beispiele an der PTB dafür sind unter anderem das Tilted-Wave Interferometer oder das Virtuelle Koordinatenmessgerät. In einem von der PTB organisierten nationalen Workshop „Metrologie für virtuelle Messgeräte“ im März 2018 wurden für diese und andere Anwendungsbeispiele folgende übergeordnete Fragestellungen und Querschnittsaufgaben identifiziert:

- 1) Wie sichert man Vertrauen in Simulationsergebnisse?
- 2) Wie stellt man Vergleichbarkeit von virtuellen und realen Messungen her?
- 3) Welche Standards für Schnittstellen, Metadaten und Datenformate sind notwendig?
- 4) Wie können virtuelle Experimente für komplexe Messsysteme mit großen Datenmengen mit Hilfe von Methoden des maschinellen Lernens behandelt werden?

Die Behandlung dieser Fragestellungen durch die PTB erfordert eine kontinuierliche und intensive interdisziplinäre Zusammenarbeit. Aus diesem Grund wurde das PTB-Kompetenzzentrum „Metrologie für virtuelle Messgeräte“ (VirtMet) eingerichtet, in welchem die vorhandene Expertise gebündelt und der interdisziplinäre Austausch kontinuierlich vorangetrieben wird. Geschäftsführend koordiniert und unterstützt wird das Zentrum von der AG PSt1 „Koordination Digitalisierung“, um eine mögliche Verknüpfung der Entwicklungen in VirtMet mit anderen Vorhaben der PTB im Bereich Digitalisierung zu realisieren. Das Kompetenzzentrum wird darüber hinaus mit regelmäßigen Workshops den Austausch und die Kooperation mit externen Partnern in diesem Bereich weiter stärken.

Ausgehend von konkreten Arbeitspunkten werden die übergeordneten Fragestellungen in abteilungsübergreifenden Vorhaben bearbeitet werden. Durch die Einbettung der Vorhaben in das Kompetenzzentrum wird es einen intensiven und regelmäßigen Austausch aller Beteiligten geben, um Synergieeffekte nutzbar zu machen und eine gemeinsame Strategie zu verfolgen.

## Beteiligte Bereiche in der PTB

OE	Name	Kompetenzen
1.0	Mechanik und Akustik	Digitale Zwillinge im Bereich mechanische Größen
1.5	Flüssigkeiten	Kalibrierung von Durchflussmessgeräten
4.2	Bild- und Wellenoptik	Kalibrierung optischer Messgeräte
5.3	Koordinatenmesstechnik	Virtuelles Koordinatenmessgerät
6.2	Medizinische Bildgebung	Metrologie für bildgebende Verfahren
6.4	Neutronenstrahlung	Metrologie für bildgebende Verfahren
7.5	Wärme und Vakuum	Kalibrierung von Durchflussmessgeräten
8.4	Mathematische Modellierung und Datenanalyse	Simulationsverfahren, Messunsicherheit und Maschinelles Lernen

# Simulationen für bildgebende Verfahren in Medizin mittels Röntgenstrahlen

## Hintergrund

Aufgrund des nichtlinearen Verhaltens aktueller, bildgebender Verfahren mittels Röntgenstrahlen (CT, Mammographie) sind neue Maße für die Beurteilung der Bildqualität erforderlich. Die Entwicklung solcher Maße und deren zuverlässige Bestimmung ist entscheidend für eine optimale Balance zwischen notwendiger Strahlenbelastung und erforderlicher Bildqualität für eine sichere Diagnostik. Die Entwicklung sog. „model observer“ und die Charakterisierung von deren Unsicherheit ist dabei eine aktuelle Forschungsrichtung. Virtuelle Experimente können diese Entwicklung wesentlich unterstützen.

## Aktueller Stand

In einer Zusammenarbeit der Abteilungen 6 (Ionisierende Strahlung) und 8 (Medizinphysik und Informationstechnik) hat die PTB im Jahr 2016 die Entwicklung von Verfahren zur Beurteilung der Bildqualität im CT und bei der Mammographie aufgenommen. Neben der Entwicklung neuer Schätzmethode[n] [1-3] werden aktuell virtuelle Experimente für das CT und die Mammographie entwickelt. Ziel ist es, eine möglichst realitätsnahe Simulation zu erreichen. Die virtuellen Experimente sollen zur Entwicklung und Validierung von Methoden zur Beurteilung der Bildqualität eingesetzt werden.

Die PTB kooperiert auf diesem Gebiet u.a. mit 3 nationalen Referenzzentren für Mammographie (Münster, Oldenburg, Marburg), dem EUREF Zentrum in Nijmegen (NL), der Universität Leiden (NL), dem CEA (F), NPL (UK), sowie Charité und TU Berlin.

## Ziele und Ausblick

Die PTB finanziert zurzeit eine Postdoc-Stelle und eine PhD-Stelle zur Stärkung des Gebiets. Beide Stellen sind jeweils zur Hälfte in den beiden Abteilungen 6 und 8 angesiedelt. Zusätzlich wird sich die PTB in 2018 um ein europäisches Projekt (EMPIR) bewerben, und strebt dabei die Koordination an. Die PTB ist aktiv in Gremien (z.B. AK CT) tätig mit dem Ziel, die an der PTB entwickelten Verfahren in der Praxis umzusetzen. Eine Kooperation mit der Industrie wird angestrebt.

## Abteilungsübergreifender Charakter und Einbettung in VirtMet

Das Vorhaben ist bereits sehr gut abteilungsübergreifend organisiert. Durch die Einbettung in VirtMet werden die im Vorhaben verfolgten Ansätze und entwickelten Lösungen auch für andere Bereiche zugänglich, und es findet ein kontinuierlicher, aktiver Austausch statt.

# Übertragung des VCMM-Konzepts auf andere Bereiche und zur Nutzung in Metrological Digital Twins

## Motivation

Die in der PTB entwickelte VCMM (Virtual Coordinate Measuring Machine) wird im Bereich der Koordinatenmesstechnik seit vielen Jahren sehr erfolgreich zur prozessbegleitenden Messunsicherheitsermittlung und Messprozessoptimierung in Wissenschaft und Wirtschaft eingesetzt. Das etablierte und im Jahr 2005 mit dem Braunschweiger IHK-Technologietransferpreis ausgezeichnete PTB-Verfahren erfüllt die Anforderungen internationaler Richtlinien und Normen. Eine Übertragung auf andere messtechnische Bereiche ist wegen des komplexen Aufbaus und der zeitaufwändigen Programmierung erforderlicher Softwaremodule bisher kaum erfolgt. Eine Verbreitung des etablierten VCMM-Konzeptes auf andere metrologische Bereiche innerhalb der PTB und der Industrie durch den Aufbau eines universellen Baukastensystems für virtuelle Messprozesse (VMP) ist daher erfolgversprechend und wird zahlreiche Drittmittel-Einwerbungen (in Förderprogrammen oder direkten Industriekooperationen) zur Folge haben.

## Aktueller Stand

Das VCMM wurde vor ca. 20 Jahren in der PTB entwickelt und wird seither um zusätzliche Messaufgaben und -systeme in der Koordinatenmesstechnik erweitert. Größere Herstellerfirmen wie Zeiss und Hexagon haben das VCMM in ihren Koordinatenmessgeräten implementiert und z. B. auf der Fachmesse Control 2018 als Schwerpunktthema vorgestellt. Auch fünf Akkreditierungen belegen das Interesse der Industrie. Die Nutzung des VCMM-Konzepts in sogenannten digitalen Zwillingen wurde beispielsweise beim digitalen Wägestück der PTB als integraler Bestandteil der sich im Aufbau befindlichen Planck-Waage erfolgreich erprobt und wird in die geplanten digitalen Prozesse im Kompetenzzentrum „Wind“ (CCW), insbesondere im Bereich der Drehmomenten-Normalmesseinrichtung (DM-NME), integriert werden.

## Ziele und Ausblick

Die Ausweitung des VCMM-Konzeptes auf andere Bereiche der PTB bedient das strategische Ziel, die Industrie und Wirtschaft im Wandel der Digitalisierung durch die Entwicklung „Virtueller Messsysteme“ bzw. „Digitaler Zwillinge“ aktiv zu unterstützen. Folgende konkrete Schritte sollen dazu durchgeführt werden:

1. Abteilungsübergreifender Aufbau eines VMP-Baukastensystems:
  - Überarbeitung/Ergänzung des VCMM-Modulkonzeptes und der Schnittstellendefinitionen als Grundlage für die Verwendung im VMP-Baukastensystem
  - Dokumentation und Bereitstellung des VMP-Baukastens in einem zentralen Repositorium in der PTB für die schnelle Darstellung virtueller Messprozesse für die Industrie (aus Qualitätssicherungsgründen zunächst als PTB-Dienstleistung)
  - Bereitstellung einer Auswahl von API Wrappern
  - Anbindung an den TraCIM-Service (insb. bei Implementierung in externe Software)
  - Erstellung eines formalisierten Validierungskonzeptes mit Anforderungskatalog
2. Validierung und Optimierung des VMP-Baukastensystems durch Beispielanwendungen
  - VMP für Planckwaage (Dissertation Abt. 1, laufend) und DM-NME
  - VMP für Verzahnung (Validierung und Transfer) und optische Abstandssensoren
3. Erstellung von grundlegenden Dokumenten für den Transfer in den Kalibrierdienst

### **Abteilungsübergreifender Charakter und Einbettung in VirtMet**

Die Übertragbarkeit des VCMM-Konzeptes auf andere Metrologiebereiche macht dieses bewährte und gut beherrschte Vorgehen nutzbar für alle Abteilungen der PTB. Das VMP-Baukastensystem mit allen Modulen und Dokumentationen sollte von einer zentralen Stelle in der PTB verwaltet werden, die auch für weitere Interessenten beratend tätig ist und Doppelarbeit sowie die Gefahr von Fehlentwicklungen minimiert. Die spezifischen Anwendungen müssen in den Abteilungen bzw. Fachbereichen entwickelt und gepflegt werden. Neu entstehende Module sind in Absprache mit der zentralen Koordinierungsstelle in den VMP-Baukasten einzupflegen und die Dokumentationsdatenbank ist gemeinsam zu aktualisieren. Nach Entwicklung des universellen VMP-Baukastens wird dieser direkt auf Pilotanwendungen der Abteilungen 1 und 5 angewandt und für den allgemeinen Gebrauch optimiert. Durch die Einbettung des Vorhabens in VirtMet wird von Anfang an die spätere Erweiterbarkeit auf andere Bereiche und Abteilungen berücksichtigt und die methodischen Ansätze zu digitalen Zwillingen und simulationsbasierten Auswertungen des VMP-Baukastens mit denen der anderen Vorhaben abgeglichen.

Dabei bestehen zum VCMM weitreichende Erfahrungen, das *Vertrauen in die Simulationsergebnisse* durch Verifikationsvergleichsmessungen an ausgewählten Normalen und unter sehr unterschiedlichen Messbedingungen zu erlangen. Auf diese Weise wird auch die *Vergleichbarkeit der virtuellen und der realen Messungen* sichergestellt, indem die sich ergebende Streuung der Simulationsergebnisse und die resultierende Messunsicherheit unter Beachtung der Kalibrierunsicherheit zur Konformität führt. Nicht zuletzt wird die hohe Akzeptanz dieses etablierten Konzeptes durch die seit vielen Jahren durchgeführten Akkreditierungen seitens der DAkkS deutlich. Die Schaffung von *Schnittstellendefinitionen* für die Kommunikation der einzelnen Module der VMP-Bibliothek aufbauend auf den Vorkenntnissen aus dem VCMM ist ein Schwerpunkt des hier beabsichtigten Forschungsvorhabens. Das VCMM heute bzw. die zukünftigen Anwendungen des VMP-Baukastens bieten eine hervorragende Grundlage für den Aufbau intelligenter Messprozesse durch *maschinelles Lernen*. Entscheidungen wie die Prüfprozesseignung. Die optimale Prüfprozessdurchführung können vom Messprozess bzw. -gerät zukünftig selber getroffen werden.

# Tilted-Wave Interferometer (TWI) als Beispiel für Hand-in-Hand-Kalibrierung von realem und virtuellem Experiment

## Hintergrund

Die optische Industrie setzt in modernen optischen Systemen Asphären und Freiformflächen ein, die allerdings sehr hohe Anforderungen an die Metrologie stellen. Optische Messtechniken haben dabei eine prominente Rolle, da sie die Messobjekte nicht beschädigen. Die Industrie benötigt dringend eine Rückführung in der optischen Asphären-/Freiformflächenmetrologie, die zurzeit noch nicht verfügbar ist. Im Rahmen der Asphären- und Freiformmetrologie-Entwicklung auf internationaler Ebene ist daher mit weiteren Forschungsprojekten zu rechnen.

## Aktueller Stand

In der PTB wird das berührungslos arbeitende Tilted-Wave Interferometer (TWI) eingesetzt. Bei dessen Messprinzip wird die optische Wirkung des Messsystems und des Messobjektes auf Wellenfronten aus einer Vielzahl von Einfallrichtungen von einer Kamera aufgenommen [4]. Das sich ergebende Interferenzstreifenmuster ist sehr komplex, und man kann nur durch Simulation des Messvorgangs und durch das Lösen mehrerer inverser Probleme auf die Oberflächenform des Messobjektes zurück schließen. Das virtuelle Experiment ist dabei Teil der Modellierung des Messvorgangs. Zentrale Zielstellung der PTB ist die Unsicherheitsbestimmung, die durch Kombination des virtuellen Experiments mit dem realen Messaufbau ermittelt werden soll [5,6].

In der PTB wird das Thema zu gleichen Teilen von FB 4.2 und FB 8.4 bearbeitet. Die PTB kooperiert außerdem mit der Universität Stuttgart, wo das grundsätzliche Messprinzip erfunden wurde, und der Mahr GmbH, die eine kommerzielle Version des TWI vermarktet. International besteht eine Kooperation mit vielen NMIs, Hochschulen und Firmen innerhalb von EMRP/EMPIR-Projekten sowie mit dem Nanotechnologie-Kompetenzzentrum Ultrapräzise Oberflächenbearbeitung e.V. (CC UPOB), das sich als Experten-Forum für Asphären und Freiform-Metrologie und Herstellung etabliert hat.

## Ziele und Ausblick

Die Weiterentwicklung des TWI-Konzeptes gliedert sich im Arbeits- und Forschungsprogramm der PTB in den Themenbereich 5: Länge, dimensionelle Metrologie ein. Das Vorhaben wirkt sich speziell als Förderung der deutschen und europäischen optischen Industrie und der dazugehörigen Messgerätehersteller aus. Asphären und Freiformflächen sind eine herausragende zukunftssträchtige Entwicklung in optischen Systemen und wirken sich auf high-end-Kamerasysteme, industrielle Kamerasysteme und auch Kameraanwendungen im Automotive- und Consumer-Bereich aus. Das Ziel ist, der PTB durch die Realisierung einer hochgenauen Rückführung durch Kombination von realem und virtuellem Experiment eine Schlüsselrolle in der optischen Asphären- und Freiformflächenmetrologie zu erarbeiten. Der Transfer dieser Rückführung in die Industrie ermöglicht dort eine wesentlich präzisere Fertigung und wird sich insbesondere sehr positiv auf die deutsche bzw. europäische Wettbewerbsfähigkeit auswirken.

## Abteilungsübergreifender Charakter und Einbettung in VirtMet

Das TWI ist ein markantes Beispiel für ein mathematikbasiertes optisches Messgerät. Das spiegelt sich auch in der Behandlung des Themas in der PTB wider, die zu gleichen Teilen in den Fachbereichen Bild- und Wellenoptik und Mathematische Modellierung und

Datenanalyse erfolgt. Regelmäßige gemeinsame Arbeitstreffen in Braunschweig und Berlin sind fester Bestandteil der Arbeit an dem Thema. Zentraler Teil des Vorhabens ist die Unsicherheitsbestimmung des TWI, die über die aus den Simulationen gewonnen Sensitivitäten ermittelt werden kann. Zusätzlich kann in gewissen Grenzen (d. h. typischerweise oberhalb 50 nm Unsicherheit) auch ein Vergleich mit hochgenauen Koordinatenmessgeräten erfolgen.

Die Frage der Vergleichbarkeit von virtuellen und realen Messungen stellt sich beim TWI-Prinzip nicht, da das virtuelle Experiment Teil der realen Messung ist. Jedoch werden die beim TWI zu bearbeitenden Fragen der verlässlichen Charakterisierung des virtuellen Teils der Messung auch in anderen Vorhaben in VirtMet eine elementare Rolle spielen. Das TWI ist außerdem ein sehr komplexes Messsystem, bei dem Prozesse des maschinellen Lernens insbesondere bei der Kalibrierstrategie des optischen Systems und der optimalen Prüflingspositionierung sehr hilfreich sein können.

# Entwicklung eines virtuellen Durchflussmessgeräts

## Hintergrund

Ziel dieses Vorhabens ist es, numerische Strömungssimulationen als verlässliches und praktikables Werkzeug für die Kalibrierung sowie Unsicherheitsbestimmung von Durchflussmessgeräten (DFM) zu etablieren. Der FB 7.5 arbeitet seit längerem mit verschiedenen Herstellern von Durchflussmessgeräten zusammen (bspw. FLEXIM oder KROHNE). Wichtige Arbeitsinhalte sind dabei CFD-Simulationen, um verschiedene Strömungskonfigurationen zu simulieren und deren Auswirkungen auf die Messgeräte zu analysieren. Der FB 8.4 war in den letzten Jahren an einer Reihe von EMRP- und EMPIR-Projekten beteiligt, bei denen es zum einen um Strömungssimulationen (EMRP ENG58, EMPIR 16ENG07) und zum anderen um die Bestimmung von Unsicherheiten ging (EMRP NEW04). Die Möglichkeit Durchflussmessgeräte mit Hilfe von Simulationen virtuell mit deutlich höherer Genauigkeit beurteilen zu können, würde nicht nur die aktuellen Forschungsk Kooperationen festigen, sondern weitere Projektpartnerschaften ermöglichen (bspw. durch ein gemeinsames EMPIR-Projekt im Energy oder Industry-Call). Mittels der beschriebenen Entwicklung wäre es für Hersteller wesentlich günstiger, Messgeräte neu zu entwickeln und bestehende Messgeräte weiter zu verbessern.

Komplementiert werden die geplanten Arbeiten durch die Entwicklung eines virtuellen Durchflussmessgeräts für Wasserzähler im FB 1.5 im Rahmen eines laufenden EMPIR-Vorhabens, das die Abschätzung des Einflusses der Wasserqualität auf die Messqualität von Wasserzählern ermöglichen soll. In einem zweiten Schritt wird das im Projekt aufgesetzte Gerüst auf die Kalibrierung von Durchflussmessgeräten übertragen werden, um zukünftig den Einfluss dynamischer Messbedingungen auf die Messabweichung ermitteln und damit eine Aussage zur Kalibrierqualität machen zu können.

## Aktueller Stand

Vorarbeiten im Rahmen von Kooperationen in abgelaufenen Drittmittelprojekten der Fachbereiche 7.5 und 8.4 haben bereits zu vier gemeinsamen Journal-Papers auf dem Gebiet geführt und damit eine fundierte Grundlage geschaffen [7-10]. Das im Jahr 2018 gestartete EMPIR-Projekt METROWAMET wird, koordiniert vom Fachbereich 1.5, als ein Ziel die Entwicklung eines virtuellen Durchflussmessgerätes mit Schwerpunkt Wasserzähler haben.

## Ziele und Ausblick

Strömungssimulationen gewinnen im industriellen Umfeld zunehmend an Bedeutung, da sie eine kostengünstige Alternative zu teuren Prototypenfertigungen und aufwendigen Messungen darstellen. Mit der Entwicklung von Methoden, die in ein virtuelles Messgerät münden, können Durchflussmessgeräte bereits am Computer optimiert und Korrekturfaktoren den jeweiligen Strömungsbedingungen angepasst werden. Dadurch kann bei der Entwicklung und Bewertung neuer Messgeräte eine große Anzahl aufwändiger und teurer Messungen eingespart werden. Daher ist es für die PTB nötig, für die Simulation von Rohrströmungen geeignete Angaben von Unsicherheitsbetrachtungen und kalibrierte Testfälle für die Zulassung von Wärmezählern zur Verfügung zu stellen, damit eine höhere Genauigkeit der Berechnungen und deren verbesserte Unsicherheitsquantifizierung erreicht und eine gesteigerte Verlässlichkeit der Vorhersage des Messwerts ermöglicht werden kann.



### **Abteilungsübergreifender Charakter und Einbettung in VirtMet**

Die Messung des Durchflusses von Flüssigkeiten spielt in vielen Bereichen eine wichtige Rolle, sei es beispielsweise in der industriellen Anwendung, der Pharmazie und Medizintechnik oder auch bei der Messung des Wasserverbrauchs im eigenen Haushalt. Dementsprechend vielfältig sind die Messgeräte, Messbedingungen und die Anforderungen, die von den Geräten zu erfüllen sind. Die in der PTB sich in Entwicklung befindenden bzw. geplanten virtuellen Durchflussmessgeräte werden DFM für einen wesentlichen Bereich der genannten Anwendungen abdecken.

Durch die Möglichkeit von hochpräzisen Messungen am Fachbereich 7.5 können Parameter der Turbulenzmodelle neu bestimmt werden. Die im Fachbereich 8.4 vorhandene Expertise soll genutzt werden, um die wichtigsten Parameter und Konstanten der Turbulenzmodelle zu identifizieren sowie die Implementierung der neuen Parameter/Gleichungen in ein Softwarepaket zu realisieren. Basierend auf Messdaten und punktuellen Simulationen soll ein Surrogatmodell entwickelt werden. Dafür müssen eine geeignete Messdatenbasis sowie geeignete Methoden zur Surrogatmodellierung identifiziert und geschaffen werden. Durch Lösen des inversen Problems kann der Messfehler, der sich aus der Strömungscharakteristik und dem Messprinzip ergibt, korrigiert werden. Neben der Unsicherheit der Messung muss auch der Unsicherheitsbeitrag aufgrund der Modellparameter durch ein geeignetes mathematisches Verfahren bestimmt werden. Dafür kann z. B. Polynomchaos [11] verwendet werden, bei dem den Parametern statistische Verteilungen zugewiesen und deren Auswirkungen auf die berechnete Messunsicherheit quantifiziert werden.

Damit vereint dieses Vorhaben detaillierte Expertise aus mehreren Abteilungen und ermöglicht neue Erkenntnisse. Die Fachbereiche 7.5 und 8.4 können dabei auf einer bereits gut etablierten Zusammenarbeit aufbauen, von der beide Seiten profitieren. So können experimentelle Überlegungen durch CFD-Simulationen unterstützt und Simulationsergebnisse durch experimentelle Ergebnisse validiert werden.

Durch die Einbettung des Vorhabens in VirtMet können auch andere Bereiche von der entstehenden Expertise profitieren. So nehmen CFD-Simulationen schon jetzt einen großen Stellenwert bei der Forschung und Entwicklung von Durchflusssensoren ein. Zwar kann die PTB mittels hochgenauer (hier: laseroptischer) Messungen die Simulationen teilweise validieren, jedoch hat sich herausgestellt, dass die Abweichungen zwischen Simulation und Messung teilweise sehr hoch sind. Daher sind Fragen nach Vertrauen in Simulationsergebnisse, Vergleichbarkeit von virtuellen und realen Messungen sowie geeignete Schnittstellen, Metadaten und Datenformate von zentraler Bedeutung für dieses Vorhaben. Da sowohl bei der Simulation als auch bei der Messung von Strömungen sehr große Datenmengen entstehen und verarbeitet werden müssen, kann es zukünftig außerdem hilfreich sein, auf Methoden des maschinellen Lernens zurückzugreifen.

## Referenzen

- [1] A. Khanin, M. Anton, M. Reginatto, and C. Elster, "Assessment of CT image quality using a Bayesian framework", submitted to IEEE Trans Med Imaging.
- [2] M. Anton, A. Khanin, T. Kretz, M. Reginatto, and C. Elster, "A simple parametric model observer for quality assurance in computer tomography", PhysMedBiol, 2018.
- [3] M. Reginatto, M. Anton, and C. Elster, "Assessment of CT image quality using a Bayesian approach," Metrologia, 2017.
- [4] I. Fortmeier, M. Stavridis, A. Wiegmann, M. Schulz, W. Osten, and C. Elster, "Evaluation of absolute form measurements using a tilted-wave interferometer", Opt. Express 24, 3393-3404 (2016).
- [5] I. Fortmeier, M. Stavridis, A. Wiegmann, M. Schulz, W. Osten, and C. Elster, "Analytical Jacobian and its application to tilted-wave interferometry," Opt. Express 22, 21313-21325 (2014).
- [6] I. Fortmeier, „Zur Optimierung von Auswerteverfahren für Tilted-Wave Interferometer“, Dissertation, Universität Stuttgart, 2016, <http://dx.doi.org/10.18419/opus-8878>
- [7] A. Weissenbrunner, A. Fiebach, S. Schmelter, M. Bär, P. Thamsen und T. Lederer. Simulation-based determination of systematic errors of flow meters due to uncertain inflow conditions. Flow Measurement and Instrumentation, 52:25 – 39, 2016.
- [8] S. Schmelter, A. Fiebach und A. Weissenbrunner. Polynomchaos zur Unsicherheitsquantifizierung in Strömungssimulationen für metrologische Anwendungen. tm-Technisches Messen, 83(2): 71-76, 2016.
- [9] A. Weissenbrunner, A. Fiebach, M. Juling und P. U. Thamsen. A coupled numerical and laser optical method for on-site calibration of flow meters. Eccomas Proceedia UNCECOMP, 5393: 576-587, 2017.
- [10] M. Straka, A. Fiebach, T. Eichler und C. Koglin. Hybrid simulation of a segmental orifice plate. Flow Measurement and Instrumentation, available online 14 February 2018, ISSN 0955-5986, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2018.02.006>.
- [11] S. Schmelter, A. Fiebach, R. Model und M. Bär. Numerical prediction of the influence of uncertain inflow conditions in pipes by polynomial chaos. Int. J. Comp. Fluid. Dyn., 29(6-8):411-422, 2015.