

Metrologie im Fluss

Durchflussmessungen



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

129. Jahrgang, Heft 1, März 2019

Metrologie im Fluss

Durchflussmessungen

Inhalt

Metrologie im Fluss, Durchflussmessungen

- Vorwort 03
- Alles im Fluss 05
Corinna Kroner
- Metrologie im Fachbereich Gase 09
Helmut Többen
- Dienstleistung und Forschung für die Wärmemessung in der PTB 13
Karl Jousten, Thomas Eichler, Felix Heitmann, Markus Juling, Markus Kühn, Jürgen Rose, Jonas Steinbock
- Kraftstoffverbrauchsmessung – Anforderungen an die Metrologie 23
Manfred Werner, Günter Hagemann
- Kraftstoffverbrauchsmessung mit dem DP-Sensor 43
Alexander Weil
- Kavitationsdüsen – Eine neue Technologie für die Durchflussmessung von Flüssigkeiten 49
Daniel Schumann
- Messung kleiner Volumenströme in der Medizintechnik 53
Stephan Klein
- Lowest traceable flow rates in micro fluidics
and new measurement possibilities for response time characterization 61
Hugo Bissig, Martin Tschannen, Marc de Huu
- Realitätsnahe Prüfung von Wasserzählern 65
Daniel Schumann
- Industrie 4.0 in der Produktion von Wohnungswasserzählern 67
Dietmar Grimm
- Wasserzählerprüfung im Industrie 4.0-Umfeld 69
Alexander Rombach
- Digitalisierungsaspekte im Bereich Prozessinstrumentierung – Verfügbarkeit und Kundennutzen heute 71
Kurt Polzer, Florian Beyer

PTB-Innovationen

- Ausgesuchte Technologieangebote und Erfolgsgeschichten 73

Vorwort

Sei es in der produzierenden Industrie, der Medizintechnik, der Messung des Kraftstoffverbrauchs oder auch des Wasserverbrauchs im eigenen Haushalt – die Messung des Durchflusses von Flüssigkeiten spielt in vielen Bereichen eine wesentliche Rolle. Dementsprechend hoch ist die wirtschaftliche Bedeutung der Durchflussmessung in Deutschland: Mit Durchflusssensoren werden Umsätze von ca. 80 Mrd. Euro kontrolliert. Dazu sind noch u. a. Steuereinnahmen von mehr als 40 Mrd. Euro aus dem Mineralölhandel zu addieren. Namhafte Hersteller von Durchflusssensoren und Prüfständen haben ihren Sitz in Deutschland. Im Jahr 2016 wurden in Deutschland Verbrauchszähler und Durchflusssensoren für die produzierende Industrie im Umfang von mehr als 266 Mio. Euro produziert; 62 % der Geräte wurden exportiert. Der Anteil von in Deutschland ansässigen Firmen auf diesem Sektor am europäischen Markt lag bei über 30 %; die Wachstumsrate über die letzten 5 Jahre lag bei 20 %. Im Bereich der Wasserzähler liegt die weltweite Marktabdeckung durch deutsche Firmen je nach Region zwischen 50 % und 70 %. Die Korrektheit der mit den Geräten durchgeführten Durchflussmessungen muss gewährleistet sein. Dies wird durch die Rückführung auf das Nationale Normal für die Durchflussmessung von Flüssigkeiten in der PTB garantiert.

Zentrale Aufgabe und Verpflichtung der PTB als nationalem Metrologieinstitut Deutschlands ist es, eine messtechnische Infrastruktur auf höchstem internationalem Niveau bereitzustellen, die den Bedarf der deutschen Wirtschaft erfüllt und zur Hinterlegung der Ansprüche einer komplexen Gesellschaft geeignet ist. Vorausschauende Forschung und Entwicklung im Bereich der Metrologie sowie die Bereitstellung wissenschaftlich-technischer Dienstleistungen auf dem erforderlichen aktuellen Stand der Technik bilden hierfür die Eckpfeiler.

Die Aufgaben der PTB unterteilen sich in die Darstellung und die Weitergabe der Einheiten. Unter Darstellung wird das Erzeugen oder Erfassen von Messwerten auf metrologisch höchstem Niveau mit sogenannten Primärrealisierungen, den nationalen Normalen, verstanden; unter Weitergabe ist der Vorgang des Kalibrierens innerhalb der Kalibrierhierarchie zu verstehen. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass letztendlich auch auf der untersten Ebene der Kalibrierkette die Messergebnisse der industriell für Messzwecke gefertigten Produkte auf das SI-Einheitensystem rückgeführt sind. Gerade vor dem Hintergrund des sich weiter verschärfenden Wettbewerbs und dem Streben nach immer kleineren Messunsicherheiten auf Kundenseite ist die PTB mit ihren Referenzanlagen ein essenzieller und unabhängiger Partner des industriellen Messwesens. Die Qualität der Anlagen ist für jedermann transparent, da Informationen hierzu in Form von Einträgen in der Datenbank des *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM) zu Schlüsselvergleichen und in begutachteten Publikationen allgemein zugänglich sind.

Die Besonderheit der Durchflussmessung von Flüssigkeiten im Vergleich zu anderen Einheiten besteht darin, dass große Bandbreiten in metrologisch geeigneter Weise abzudecken sind. Die zu messenden Flüssigkeiten reichen vom Trinkwasser über Mineralöl und Mineralölprodukte sowie verflüssigte Gase bis hin zu Pharmazeutika, Lacken, Farben, Lebensmitteln und vielen anderen chemischen Zwischen- und Endprodukten. Gleichzeitig sind große Spannen hinsichtlich Menge und Durchfluss abzudecken, dies bei variierenden Transporteigenschaften der zu messenden Flüssigkeiten, gegeben durch Dichte und Viskosität, und unter variierenden Betriebsbedingungen, gegeben durch Druck und Temperatur. Jedes

* Dr. Corinna Kroner,
Fachbereich
„Flüssigkeiten“,
PTB Braunschweig,
E-Mail: corinna.kroner@ptb.de

Messgerät müsste genau genommen mit der Flüssigkeit geprüft beziehungsweise kalibriert werden, für die es eingesetzt werden soll. Dies bedeutet, dass für jede messtechnisch relevante Flüssigkeit eine eigene Rückführbarkeitskette aufzubauen wäre, was sowohl aus wirtschaftlichen wie auch aus metrologischen Gründen nicht sinnvoll ist. Aus diesem Grund kommt der Übertragung von Prüfungen und Kalibrierungen eines Durchflussmessgeräts für eine Flüssigkeit auf eine andere eine besondere Bedeutung zu. Dies ist nach wie vor Gegenstand der aktuellen Forschung.

Eine Reihe aktueller Entwicklungen im Bereich der Durchflussmessung von Flüssigkeiten wurde im November 2018 in einem PTB-Seminar präsentiert. Mit dem Seminar „Metrologie im Fluss“ setzt die PTB die lange Tradition von PTB-Seminaren auf dem Gebiet der Durchflussmessung fort. Das 50-jährige Bestehen der „Durchflussmessung“ in der PTB als eigenständiger Bereich wurde dieses Mal zum Anlass genommen, einen Blick nach vorn auf aktuelle Themen und Entwicklungen aus Forschung und Praxis auf dem Gebiet der Durchflussmessung von Flüssigkeiten zu werfen. Die in dieser Ausgabe enthaltenen Beiträge wurden im Rahmen des Seminars präsentiert. Darüber hinaus stellen sich die thematisch benachbarten Fachbereiche „Gase“ und „Wärme und Vakuum“ mit ihren Tätigkeitsschwerpunkten vor.

Alles im Fluss

Corinna Kroner*

Eine Grundfläche, auf die drei Einfamilienhäuser passen, mehrere Etagen hoch, im Inneren unzählige Rohrleitungen, so zeigt sich das Hydrodynamische Prüffeld (HDP), das Nationale Normal Deutschlands für die Durchflussmessung von Flüssigkeiten, dem Besucher. Mit den von ihm abgedeckten Durchflussraten von 300 l/h bis 2.100 m³/h (zum Vergleich: eine klassische vollgefüllte Badewanne fasst 120 l) und dem hohen oberen Durchflussbereich ist das Prüffeld eine von nur fünf Anlagen ihrer Art an einem Metrologieinstitut weltweit. Seit vielen Jahren ist die Anlage das Herzstück des Fachbereichs 1.5 „Flüssigkeiten“.

Der Fachbereich 1.5 „Flüssigkeiten“ ist heute schwerpunktmäßig im Umfeld der Darstellung und Weitergabe des Durchflusses von strömenden Flüssigkeiten, der Darstellung und Weitergabe des Volumens ruhender Flüssigkeiten und von Konformitätsbewertungen im Rahmen der europäischen Messgeräterichtlinie und gemäß der Mess- und Eichverordnung tätig. Die messtechnische Infrastruktur ist stark von Prüfständen für Durchflussmessungen geprägt. Dies war nicht immer so. Der Bereich hat über die Jahrzehnte einen deutlichen Wandel durchlaufen.

Am Anfang waren die Volumenmaße

In den Anfangszeiten der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Ende der 1940er Jahre, damals noch als PTA (Physikalisch-Technische Anstalt), sah die metrologische Welt der Flüssigkeiten noch deutlich anders aus als bereits wenige Jahre später. Alle eichfähigen Messgeräte aus den Bereichen Masse, Kraft, Flüssigkeiten und Gase waren in einer Unterabteilung des Wirtschaftsministeriums zusammengefasst. Der Schwerpunkt der Aufgaben lag auf der Kalibrierung von Volumenmaßen. Hierfür standen verschiedenste Eichkolben, Trockenausmessgeräte und Fass-Kubierapparate zur Verfügung (Bild 1). Direkt neben den Apparaten befanden sich eine Bleischmelze und ein Gasglühofen, mit dem die Brennstempel erhitzt werden konnten.

Deutschland wird mobil

Doch die Aufgaben nahmen schnell zu, was dazu führte, dass Ende der 1950er-Jahre zunächst der Prüfstand für Wasserzähler und Durchflusssensoren und kurz danach der Prüfstand für Mineralölzähler aufgebaut wurde (Bild 2). Der wachsende Wohlstand in der Bevölkerung hatte einen maßgeblichen Anteil hieran.

* Dr. Corinna Kroner, Fachbereich „Flüssigkeiten“, PTB Braunschweig, E-Mail: corinna.kroner@ptb.de



Bild 1:
Fasseichraum, 1947

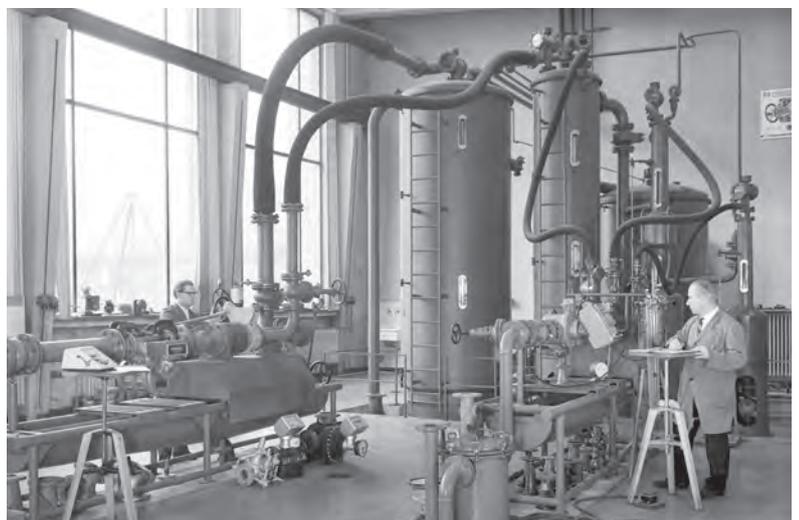


Bild 2:
Messungen am Mineralölzählerprüfstand, 1969

Wie Bluschke (1960, [1]) anmerkte „... Die Bestimmung des Volumens von Flüssigkeiten hat im Laufe des letzten Jahrzehnts infolge der rapiden Motorisierung in Deutschland und der seit kurzem stark gestiegenen Verwendung von Heizölen erheblich an Bedeutung gewonnen, so daß die Produktion von Volumen-Meßgeräten und vor allem von Volumenzählern für Mineralöle außergewöhnlich angewachsen ist. ...Man erhält eine Vorstellung von der Vielzahl der verwendeten Zähler, wenn man bedenkt, daß jedes Liter Benzin, bevor es in den Tank eines Autos fließt, etwa viermal mit Zählern verschiedener Größe und Ausführung gemessen worden ist.“

Gegen Ende der 1960er-Jahre war das Aufgabenspektrum des Bereichs Durchflussmessungen so angewachsen, dass er eigenständig wurde. Die Fachgruppe 1.5 „Flüssigkeiten, Gase“ wurde am 15. April 1968 etabliert und blieb bis Ende Juni 2003 unter verschiedensten Namen bestehen.

Die „wilden“ 1970er- und die „bewegten“ 1980er-Jahre

Waren die 1960er-Jahre stark von der zunehmenden Motorisierung Deutschlands und den damit

verbundenen Anforderungen an die Volumen- und Durchflussmessung geprägt, so waren später die Einführung von Selbstbedienungstankstellen (Bild 3) und die Überprüfung der Eichgültigkeitsdauer von Kaltwasserzählern Thema. Die PTB stellte mit ihren Untersuchungen sicher, dass für den gezahlten Betrag auch die korrekte Benzinmenge abgegeben wurde. Auf Anregung der PTB wurde von den Zapfsäulenherstellern ein „Anti-Trampel-Ventil“ eingebaut, das das Absaugen des Benzins bei Treten auf den Schlauch verhinderte. Damit konnte eine Zapfsäule nicht mehr gemolken werden

Das dominierende Thema in den 1980er-Jahren war die Richtigkeitsprüfung von Kaltwasserzählern nach Ablauf der Eichgültigkeitsdauer. Als Folge der Analyse der Prüfergebnisse von 30.000 Wasserzählern wurde die Eichgültigkeitsdauer herabgesetzt. Zudem wurde vorgeschlagen, ein Stichprobenverfahren zur Verlängerung der Eichgültigkeitsdauer einzuführen, was in der Eichordnung von Januar 1993 an Berücksichtigung fand.

Bild 3:
Zapfsäulenprüfstand, Ende der 1980er-Jahre



Ein Umbruch

Über die Jahre stiegen die Anforderungen an die Durchflussmessung stetig. Gleichzeitig konnten bis dato in der PTB angesiedelte Routine-Messaufgaben nach außen vergeben werden. Dies resultierte in einem Umbruch in der messtechnischen Infrastruktur. „Bruch“ hier im wahrsten Sinne des Wortes, denn der alte Wasserzählerprüfstand wurde heiß abgerissen. Allen damals Beteiligten ist der Abriss heute noch in lebhafter Erinnerung, verschwand doch nicht nur der Prüfstand, sondern ungewollt gleich noch ein Aktenarchiv mit.

Es kam zu einer Schwerpunktverlagerung von der Darstellung und Weitergabe des Volumens ruhender Flüssigkeiten hin zur hochgenauen Durchflussmessung über mehrere Skalen und deren Weitergabe. Verbunden mit dieser Veränderung war die Etablierung eines nationalen Normal in Deutschland für die Durchflussmessung. Nach einer mehrjährigen Planungs- und Bauzeit (Bild 4, 5) nahm das Hydrodynamische Prüffeld im Jahr 2004 seinen Kalibrierbetrieb auf. Im Jahr zuvor war das Themengebiet Durchflussmessungen in die Fachbereiche „Gase“ und „Flüssigkeiten“ aufgeteilt worden. Nach und nach wurde auch eine Infrastruktur aufgebaut, um verstärkt Vorlaufforschung im Umfeld der Durchflussmessung von Flüssigkeiten betreiben zu können. So wird das HDP heute durch den Mineralölzählerprüfstand, das zweite Primärnormal, sowie durch weitere nachgeordnete Prüfstände für Wasser und Testbenzin, die kleinere Durchflussbereiche bis 30 l/h bzw. 1 l/h abdecken, ergänzt. Diese Prüfstände werden im Wesentlichen zu Forschungs- und Entwicklungszwecken eingesetzt. Eine Anlage für

Durchflussmessungen bis in den 10er-ml/l-Bereich befindet sich im Aufbau.

Die Verantwortlichkeiten im gesetzlichen Messwesen bestanden zwar fort, aber auch hier blieb nicht alles beim Alten. Im Jahr 2004 wurde die Europäische Richtlinie für Messgeräte (MID) eingeführt, welche das Inverkehrbringen gesetzlich geregelter Messgeräte neu regulierte. Im Vorfeld der Einführung galt es, Hersteller und Verwender gesetzlich geregelter Messgeräte entsprechend vorzubereiten. Heute bearbeitet der Fachbereich um die dreihundert Vorgänge pro Jahr allein im Umfeld der MID und weitere fünfzig im Rahmen der Verordnung über das Inverkehrbringen und die Bereitstellung von Messgeräten auf dem Markt sowie über ihre Verwendung und Eichung (Mess- und Eichverordnung – MessEV).

Wer rastet, der rostet

Wie bereits in den Vorjahren verfolgt der Fachbereich auch weiterhin konsequent das Ziel, seinen durch Gesetze und Regularien festgelegten Aufgaben bedarfsgerecht und auf hohem Niveau nachzukommen. Schlüsselemente sind hier vorausschauende Forschung und Entwicklung im Bereich der Metrologie sowie die Bereitstellung wissenschaftlich-technischer Dienstleistungen auf dem erforderlichen aktuellen Stand der Technik. Die Prüfstände im Fachbereich unterliegen daher einem stetigen Erneuerungs- und Validierungsprozess.

Heute sind zum Beispiel im gesetzlichen Messwesen Anforderungen an Hochdruck-Wasserstoff-Zapfsäulen und Selbstbedienungseinrichtungen für Stromladesäulen ein Thema. Mit Blick auf die Stichprobenprüfung von Verbrauchszählern haben Untersuchungen im Fachbereich gezeigt, dass das in PTB-Mitteilungen festgelegte Verfahren zur Stichprobenprüfung von Kaltwasserzählern unverändert auch für Warmwasser- und Messkapselzähler angewendet werden kann [2]. Die Mitarbeit in Gremien und damit verbunden an normativen Dokumenten und Empfehlungen ist nach wie vor ein essenzieller Baustein, um die Beratungsverpflichtung aus dem EinhZeitG und MessEG zu erfüllen und Interessen der deutschen Wirtschaft und Verbraucher national wie international zu verfolgen. So ist der Fachbereich auf internationaler Ebene im EURAMET TC-Flow, in mehreren Gremien des OIML-TC8 „*Measurement of quantities of fluids*“ und in den WELMEC-Arbeitsgruppen WG10 „*Measuring equipment for liquids other than water*“ und WG13 „*Water and heat meters*“ sowie in CEN/TC92/WG2 und in der CCM Working Group on Fluid Flow aktiv. Hinzu kommt die Mitarbeit in Ausschüssen und Arbeitskreisen des DIN und DVGW, der AGME und des DKD im nationalen Bereich.



Bild 4:
Waagenfundamente des HDP

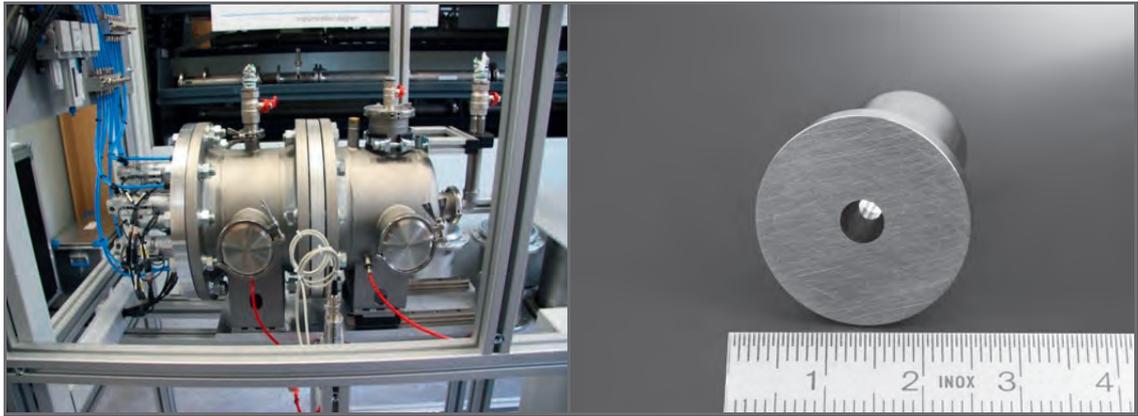


Bild 5:
Installation der
Wägebühnen des
HDP

Einen großen Raum in den Fachbereichsaktivitäten nimmt die Entwicklung einer messtechnischen Infrastruktur ein, mit der eine rückgeführte realitätsnahe Charakterisierung des Messverhaltens von Wasserzählern und Durchflusssensoren möglich werden wird. In diesem Zusammenhang ist die Verwendung von Kavitationsdüsen in der Durchflussmessung von Flüssigkeiten ein zentrales Thema (Bild 6). Durch Ausnutzung von Kavitation lassen sich nicht nur schnell stabile Durchflüsse, sondern auch stabile Durchflussänderungen generieren. Dies eröffnet die Möglichkeit, Sensoren und Zähler nah an realen Einsatzbedingungen zu evaluieren. Weitere Informationen hierzu finden sich in einem separaten Artikel in dieser Ausgabe.

Eine aktuelle Aufgabe ist der Aufbau eines vorkonfektionierten Transfornormal-Modulsatzes. Hiermit wird die Weitergabe des „Durchflusses von Flüssigkeiten“ auf ein neues Qualitätsniveau gehoben und so auf die gestiegenen Anforderungen an die Einheitenweitergabe reagiert werden. Der Modulsatz, der für die Durchflussmessung von Flüssigkeiten im Bereich von

Bild 6:
Kavitationsdüsenap-
paratur und Beispiel
einer Kavitations-
düse



1 l/h bis 2.100 m³/h eingesetzt werden soll, wird umfassend charakterisiert und mit einer dokumentierten Historie versehen sein. Er wird die Möglichkeiten zur Forschung für eine zukunftsgerichtete Weitergabe der Größe „Durchfluss von Flüssigkeiten“ mit entsprechendem Dienstleistungsangebot deutlich erweitern. Mit der neuen Infrastruktur wird sowohl den satzungsgemäßen Aufgaben der PTB als auch dem Kundenbedarf nachgekommen.

Der digitale Fortschritt ist gleichfalls ein Thema im Fachbereich „Flüssigkeiten“. Das Messen des Durchflusses von Flüssigkeiten hat sich zwischenzeitlich zu einem Fluss von Daten erweitert. Geräte werden mehr und mehr vernetzt und müssen deshalb reibungslos miteinander kommunizieren. Dies muss realisiert werden, ohne dass die Metrologie kompromittiert wird. Der Schritt zum digitalen Kalibrierschein ist dann nicht mehr weit. Mit einem virtuellen Durchflussmessgerät soll es möglich werden, das Verhalten von Durchflusssensoren und Zählern unter gegebenen Messbedingungen abzuschätzen.

Der Fachbereich war über die Jahre einem steten Wandel unterworfen, nah am Puls wirtschaftlicher Entwicklungen und gesellschaftlicher Belange. Dies wird auch in Zukunft nicht anders sein.

Literatur

- [1] Bluschke, H., 1960. *Der Prüfstand für Mineralölzähler der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt. Erdöl und Kohle, Erdgas, Petrochemie.* Nr. **10**, 761–763
- [2] Wendt, G., 2015. *Untersuchung von Wohnungswasserzählern bezüglich Messverhalten und Messstabilität während ihres Einbaus in kommunalen Versorgungsnetzen.* https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_1/1.5_fluessigkeiten/2015-11-Statement-3_a.pdf (Letzter Zugriff 6.3.2019)

Links

- [1] Webseite des Fachbereichs: <https://www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt1/fb-15.html> (Letzter Zugriff 6.3.2019)

Metrologie im Fachbereich Gase

Helmut Többen*

Sieht man sich das Organigramm der PTB an, so glaubt man sich im Inhaltsverzeichnis eines Schulbuches der Physik. So ist der Fachbereich „Gase“ wie der Fachbereich „Flüssigkeiten“ in der Abteilung Mechanik und Akustik angesiedelt, eine von insgesamt acht wissenschaftlich-technischen Abteilungen der PTB, die sich mit metrologischen Herausforderungen wie zum Beispiel auch in der Elektrizität, Optik oder Medizinphysik intensiv beschäftigen. Der Fachbereich Gase mit seinen 25 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern ist für die metrologisch korrekte Geschwindigkeits-, Mengen- und Durchflussmessung strömender Gase sowie für die Bestimmung der kalorischen Größen von Gasen zuständig und übt innerhalb seiner Themengebiete auch das gesamte, für die PTB typische Tätigkeitsspektrum aus. Hierzu gehören die Forschung und Entwicklung im Bereich der Einheiten, die Prüfung und Kalibrierung von Messgeräten sowie die Durchführung von Konformitätsbewertungen im Bereich des gesetzlichen Messwesens. Zudem ist der Fachbereich bei Akkreditierungs- und Anerkennungsverfahren gutachterlich aktiv und arbeitet in nationalen und internationalen Gremien und Vereinigungen mit.

In der Sprache der Metrologie ist der Fachbereich Gase somit u. a. auch für die Darstellung und Weitergabe der ihm zugeordneten Messgrößen zuständig. Orientiert an den im Fachbereich installierten vier Arbeitsgruppen Strömungsmesstechnik, Gasmessgeräte, Hochdruck-Gas und Kalorische Größen sollen im Folgenden die wesentlichen Aufgaben kurz erläutert werden.

In der Arbeitsgruppe Strömungsmesstechnik werden laseroptische Verfahren für die Strömungsgeschwindigkeits- und Durchflussmessung sowie deren messtechnische Rückführung auf die SI-Einheiten entwickelt und eingesetzt sowie Dienstleistungen für Dritte durchgeführt. Die messtechnische Ausstattung umfasst traversierbare Laser-Doppler-Anemometersysteme, Laser-Doppler-Strömungsprofilsensoren, Windkanäle in unterschiedlichen Ausführungen sowie ein neuentwickeltes Wind-Lidar-Messsystem. Eingesetzt werden die Systeme zur Untersuchung von Strömungsprofilen in Rohrleitungen, zur

berührungslosen Volumenstrombestimmung bei der Hochdruck-Erdgasmessung, in Windkanälen zur Kalibrierung von Anemometern und im freien Gelände für örtlich hochaufgelöste Windgeschwindigkeitsmessungen.

Für die Messgröße Strömungsgeschwindigkeit steht an der Spitze der Kalibrierkette eine mit hoher Präzision um ihre Achse rotierende zylindrische Glasscheibe, deren Umfangsgeschwindigkeit mit einer Messunsicherheit von besser als 0,05 % dargestellt werden kann (Bild 1).



Mit diesem Primärnormal werden auf der zweiten Stufe der Kalibrierkette Laser-Doppler-Anemometer (LDA) kalibriert, die dann entweder direkt als kalibriertes Messgerät für die berührungslose Strömungsgeschwindigkeitsmessung oder als Bezugsnorm (Referenz) in Windkanälen zur Kalibrierung von Strömungssensoren wie Staudrucksonden, Hitzdraht- oder Flügelrad-Anemometern zum Einsatz kommen.

Ein sehr interessanter F&E-Schwerpunkt ist die Entwicklung eines neuartigen Lidar-Systems für die Windenergiebranche (Bild 2). Lidar steht für „light detection and ranging“ und ist ein bodengestütztes Fernmessverfahren, das insbesondere auch für Windgeschwindigkeitsmessungen in

* Dr. Helmut Többen,
Fachbereich „Gase“,
PTB Braunschweig,
E-Mail:
helmut.toebben@ptb.de

Bild 1:
Messaufbau zur
Kalibrierung von
LDA-Systemen (vor-
ne) mit dem PTB-
Primärnormal für
die Einheit „Strö-
mungsgeschwin-
digkeit“ (rechts)



Bild 2:
PTB-Lidar System
für hochaufgelöste
Windgeschwindig-
keitsmessungen

Messhöhen von ca. 40 m bis über 250 m eingesetzt wird. Konventionelle Lidar-Systeme weisen aufgrund ihres Messprinzips ein sehr großes Messvolumen auf und liefern deshalb lediglich im flachen Gelände verlässliche Messwerte. Das PTB-Lidar-System hat hingegen ein kleines, wenige dm^3 großes Messvolumen, misst direkt den Geschwindigkeitsvektor von einzelnen vom Wind mitgeführten Aerosolen und kann sowohl in flachen als auch in bewaldeten und hügeligen Geländestrukturen hochgenaue Windgeschwindigkeitswerte in Höhen bis über 250 m ermitteln. Bei ersten Vergleichsmessungen mit einem 135 m hohen, mit kalibrierter Messtechnik ausgestatteten Messmasten wurden

über einen großen Geschwindigkeitsbereich Messabweichungen von weniger als 0,5 % festgestellt. Das PTB-Lidar-System soll zukünftig als TransfERNormal konventionelle Lidar-Systeme im Feld kalibrieren bzw. langfristig sogar als Primärnormal für die Messgröße Windgeschwindigkeit eingesetzt werden können.

Vor dem Hintergrund der großen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Bedeutung von Erdgas als Primärenergieträger, aber auch von beispielsweise im chemischen, medizinischen oder automobilen Bereich eingesetzten Gasen, sind korrekte und verlässliche Messungen der Gasmengen und Gasqualitäten eine wichtige Voraussetzung, um Betriebsicherheit, Abrechnungsgerechtigkeit und lauterer Handel sicherstellen zu können. Innerhalb der PTB zeichnet sich die Arbeitsgruppe Gasmessgeräte für die Messrichtigkeit und Messbeständigkeit bei der Bestimmung der Messgrößen Volumen, Masse und Durchfluss von strömendem Gas verantwortlich. Für die Vielzahl von Kalibrier- und Prüfaufträgen betreibt sie insgesamt neun international anerkannte Prüfstände, bearbeitet im Rahmen der gesetzlichen Aufgaben europäische und nationale Konformitätsbewertungen von Gaszählern, Mengenumwertern und Zusatzgeräten, vertritt die PTB in nationalen und internationalen Gremien und arbeitet zur Sicherung der Rückführung von Industriepfständen im Deutschen Kalibrierdienst mit bzw. ist als Dienstleister für die Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS) tätig.

Als Primärnormale stehen der Arbeitsgruppe verschiedene Kolbenprüfstände sowie eine Gasmessglocke (Bild 3) zur Verfügung, jeweils mit Unsicherheitswerten, die weltweit führend sind. Mit daran angeschlossenen Prüfständen lassen sich Gasmessgeräte mit atmosphärischer Luft und Durchflüssen bis $28\,000\text{ m}^3/\text{h}$ kalibrieren. Bis zu einem Durchfluss von $10\text{ m}^3/\text{h}$ können auch technische Gase als Prüfmedium für Kalibrieraufgaben eingesetzt werden. Da die Temperatur die bedeutendste Einflussgröße auf die Messrichtigkeit der Messgeräte darstellt, wurden entsprechende Prüfmöglichkeiten geschaffen. So kann das Messverhalten von Gaszählern im Rahmen von Konformitätsbewertungsverfahren im Temperaturbereich zwischen -45 °C bis $+70\text{ °C}$ und für industrielle Anwendungen sogar bis 600 °C untersucht werden.

Neben den vielen Dienstleistungsaufgaben bleibt auch Raum für interessante Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. So wurde z. B. in der Vergangenheit in einem Verbundvorhaben bei der Bestimmung des Methanschlupfes von Biogaserzeugungsanlagen erfolgreich mitgearbeitet und aktuell werden im Zusammenhang mit dem Themenfeld Power-to-Gas Messmöglichkeiten zur metrologisch abgesicherten Mengenbestimmung von Wasserstoff-/Erdgasgemischen sowie auch für reinen Wasserstoff als alternativen Kraftstoff geschaffen.



Bild 3:
Primärnormal für
die Gasdurchfluss-
messung (Gasmess-
glocke)

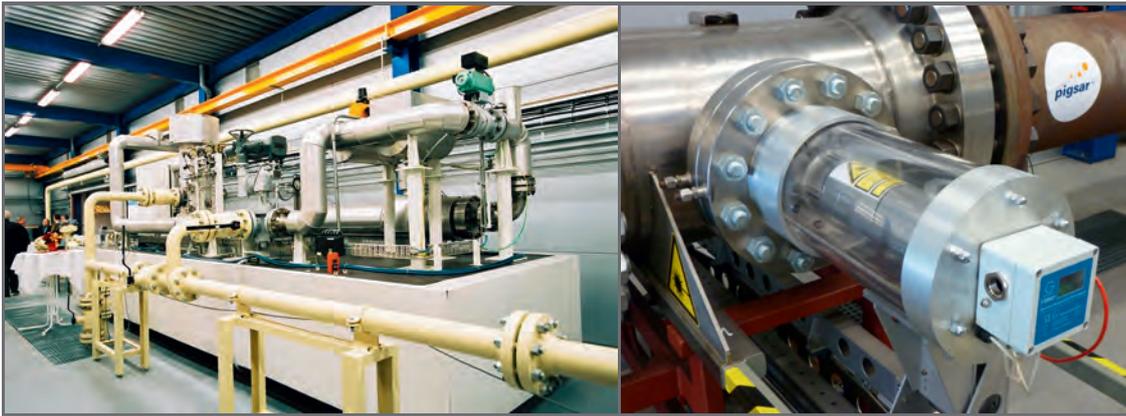


Bild 4:
Primärnormale für
Hochdruck-Erd-
gasmessung (links:
Rohrprüfstrecke;
rechts: Optisches
Durchflussnormal)

Die Arbeitsgruppe Hochdruck-Gas ist für die Darstellung und Weitergabe der Einheiten Volumen, Masse und Durchfluss von strömendem Gas im Anwendungsbereich bei Drücken über 0,4 MPa zuständig. Sie betreibt hierfür ein volumetrisches Primärnormal (Präzisions-Rohrprüfstrecke) und ein optisches Durchflussnormal (Bild 4) auf dem Hochdruckprüfstand *pigsar*TM des Gastransportunternehmens Open Grid Europe in Dorsten/Ruhrgebiet. Beide Normale sind für den Betrieb mit Erdgas bei Betriebsdrücken bis 5,5 MPa ausgelegt und sind mit dem Prüfstand *pigsar*TM hydraulisch direkt verbunden.

Mit Blick auf den internationalen Gashandel und den damit verbundenen Handelswerten im Milliarden-Euro-Bereich ist man allgemein bemüht, kleinste erkennbare Differenzen auch zwischen den nationalen Primärrealisierungen zu minimieren. Unter aktiver Beteiligung der Arbeitsgruppe wurde das Konsortium EuReGa (*European Reference for Gas Metering*) gegründet, das sich aus den nationalen Metrologieinstituten FORCE (Dänemark), LNE (Frankreich), VSL (Niederlande) und der PTB zusammensetzt. Auf Basis regelmäßiger multilateraler Vergleichsmessungen sorgt das EuReGa-Konsortium dafür, dass insbesondere in Europa eine einheitliche, harmonisierte Volumeneinheit für die Hochdruck-Erdgasmessung sichergestellt wird.

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der Arbeitsgruppe dienen insbesondere der technologischen Weiterentwicklung der im HD-Bereich eingesetzten Primär- und Transfernormale sowie aktuell auch der Ermittlung von Berechnungsalgorithmen, mit denen sich das Zählerverhalten in Abhängigkeit von den Betriebsparametern und den Gaseigenschaften simulieren lässt, um so die Messabweichungen der Messgeräte bei Betriebsparametern sicher abschätzen zu können, die bei der Kalibrierung z. B. hinsichtlich Druck oder Gaszusammensetzung nicht erreicht werden können.

Die Arbeitsgruppe Kalorische Größen ist für die Darstellung und Weitergabe der Einheit der Wärme mittels kalorimetrischer, das heißt direkt messender Verfahren, verantwortlich und unter-

stützt dabei insbesondere die Arbeitsgruppe Gasmessgeräte bei ihren Arbeiten zur Sicherstellung von Abrechnungsgerechtigkeit und lauterem Handel von Brenngasen, deren kommerzieller Wert sich aus ihrem Energiegehalt ergibt. Dieser Energiegehalt, der bei der Verbrennung des Gases in Form von Wärme freigesetzt wird, errechnet sich aus dem Volumenstrom und dem Brennwert des Gases, welcher kalorimetrisch mit geringster Unsicherheit ermittelt wird. So wurde in der Arbeitsgruppe das weltweit zurzeit genaueste Kalorimeter zur Bestimmung der Brennwerte von Gasen mit einer Unsicherheit von 0,05 % entwickelt. Dessen Ergebnisse fließen in die internationale Normung ein und sorgen so für eine einheitliche Energiebestimmung.

Aber auch der Energiegehalt feuchter Luft, die zur Klimatisierung und Belüftung in raumlufttechnischen Anlagen gekühlt, beheizt, be- und entfeuchtet wird, stellt einen kommerziellen Wert dar, dessen Bestimmung nach den Regeln des Mess- und Eichgesetzes zu erfolgen hat. Hier trägt die Arbeitsgruppe durch Identifizierung und Entwicklung Technischer Regeln und thermodynamische Betrachtungen zur korrekten Berechnung dieses Energiegehalts und damit auch zur Energieeinsparung in diesen Anlagen bei.

Biogas aus anaerober Vergärung sowie Wasserstoff aus Power-to-Gas-Anlagen stellen einen Baustein auf dem Weg zu einer kohlenstoffneutralen Energieversorgung dar. Hier engagiert sich die Arbeitsgruppe durch die Entwicklung von kalorimetrischen Messgeräten und -verfahren im Rahmen von europäischen Forschungsprojekten. Insbesondere bei diesen unkonventionellen Energieträgern zeigt sich die Überlegenheit der kalorimetrischen Messtechnik gegenüber der häufig verwendeten analytischen Methode, die in der Erdgasindustrie überwiegend eingesetzt wird. Während die analytische Methode beim Auftreten einer neuen Komponente (z. B. Wasserstoff) im Brenngas oder einer merklich anderen Konzentration einer Komponente (z. B. Kohlendioxid) individuell angepasst werden muss, erlauben die in der Arbeitsgruppe entwickelten und vorgehaltenen

kalorimetrischen Verfahren eine direkte Messung des Energiegehaltes auch unkonventioneller und exotischer Brenngasgemische.

Neben thermodynamischen und kalorimetrischen Untersuchungen an Gasen können auch kalorimetrische Untersuchungen an komplexen technischen Systemen, z. B. Lithium-Ionen-Batterien, durchgeführt werden. Zu diesem Zweck wurde ein neuartiges, skalierbares Kalorimeter entwickelt, das in Bild 5 dargestellt ist. Durch den modularen Aufbau ist eine Anpassung an die verschiedenen Zellgeometrien leicht möglich. Dieses Kalorimeter vereint hohe Empfindlichkeit mit großer Robustheit und hoher Preiswürdigkeit und kann damit sowohl zur Bestimmung sicherheitstechnischer Kenngrößen als auch zur Untersuchung und Optimierung der kinetisch oder thermodynamisch kontrollierten elektrochemischen Prozesse in der Batteriezelle eingesetzt werden.

Auch die klassische Kalorimetrie an festen und flüssigen Stoffen hat ihre Heimat in dieser Arbeitsgruppe. Zwecks Weitergabe der Einheit werden dem Anwender eines Kalorimeters Materialien, deren Schmelztemperatur und Schmelzenthalpie genau, d. h. mit einer Unsicherheit von 0,004 K

bzw. 0,2 %, bestimmt wurden, kommerziell angeboten. Dieser Service wird nun auf den Temperaturbereich bis 3000 °C ausgedehnt. Dazu wird ein Einwurfskalorimeter benötigt, das im Rahmen eines europäischen Forschungsprojekts entwickelt und gebaut wird.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Fachbereich Gase der PTB in einem Bereich hoher gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Bedeutung aktiv ist, die metrologische Kompetenz zur hochgenauen und präzisen Bestimmung der Geschwindigkeit, der Menge, des Durchflusses, der Beschaffenheit strömender Gase besitzt, sowie die Anerkennung hat, die in diesen Bereichen zur Anwendung kommenden Messtechniken und Messverfahren valide zu bewerten.

Links

- [1] Webseite des Fachbereichs: <https://www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt1/fb-14.html>
(Letzter Zugriff 6.3.2019)
- [2] Kalibrier- und Messmöglichkeiten: <https://www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt1/fb-14/fb-14-kalibrier.html>
(Letzter Zugriff 6.3.2019)

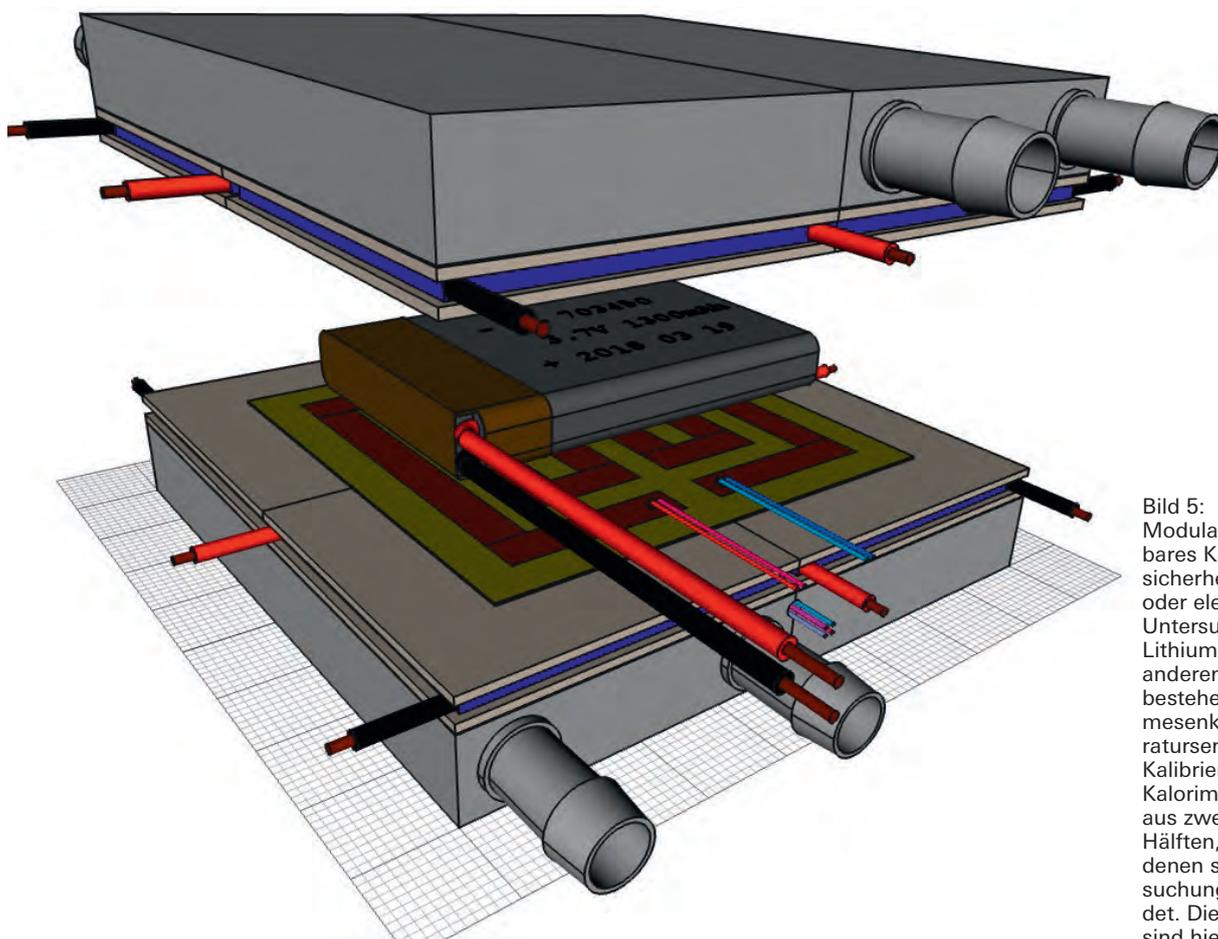


Bild 5:
Modulares, skalierbares Kalorimeter für sicherheitstechnische oder elektrochemische Untersuchungen an Lithium-Ionen- und anderen Batterien, bestehend aus Wärmesenke, Temperatursensoren und Kalibrierheizung. Das Kalorimeter besteht aus zwei identischen Hälften, zwischen denen sich das Untersuchungsobjekt befindet. Diese Abstände sind hier überzeichnet.

Dienstleistung und Forschung für die Wärmemessung in der PTB

Karl Jousten¹, Thomas Eichler², Felix Heitmann³, Markus Juling⁴,
Markus Kühn⁵, Jürgen Rose⁶, Jonas Steinbock⁷

1. Einleitung

Rund 30 % des individuellen Energieverbrauchs der Bundesbürger entfallen auf die Gestaltung des Lebens in Wohngebäuden. Nach Erhebungen der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. [1] werden davon 74 % für das Beheizen von Wohn- und Arbeitsräumen verwendet. Die novellierte Heizkostenverordnung [2] bildet einen wichtigen Bestandteil des Energie- und Klimaprogramms der Bundesregierung. Energiebewusstes Verhalten wird durch die verbrauchsabhängige Abrechnung der Heiz- und Warmwasserkosten wesentlich gefördert, was sich zeigte, als im Jahr 1981 die Verordnung in Kraft trat und zu einem deutlich veränderten Verbrauchsverhalten und erheblichen Energieeinsparungen führte.

Im Gesamtprozess werden in Deutschland jährlich rund 50 Mrd. Euro für Heizung, Kühlung und Warmwasser ausgegeben. 14 % der Heizung erfolgt aus Fernwärmenetzen, ca. 30 % werden aus lokalen Netzen bezogen. Im Jahr 2017 haben die Fernwärme-/Fernkälteversorger 132 Mrd. kWh Nettowärme erzeugt, weitere 8 Mrd. kWh kamen von sonstigen Wärmeerzeugern. Die Tendenz ist steigend, weil Neubauten vermehrt mit Fernwärme versorgt werden [1]. Mehr als zwei Drittel der Nettowärmeerzeugung entstammt (Strom-) Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen.

Die weltweit führende Position in Deutschland entwickelter Wärmezähler lässt sich am jährlichen Verkauf von ca. 3 Mio. Messgeräten am innerstaatlichen und weltweiten Markt erkennen, gleichbedeutend einem Umsatz von 300 Mio. Euro mit stark steigender Tendenz.

Der relative Marktanteil für Wasser- und Wärmezähler deutscher Hersteller liegt in Europa bei 75 %, weltweit bei 45 %. Der deutsche Wärmezählermarkt wird derzeit zu 95 % von in Deutschland entwickelten und endgefertigten Wärmezählern beherrscht.

Bei den Wärmezählerherstellern sind ca. 3000 Arbeitsplätze angesiedelt, für die Netze der Abrechnung ist der zehnfache Arbeitskräfteanteil anzusetzen. Im Ausland ist eine große Dynamik im Wärmezählermarkt in China zu verzeichnen. Hier beliefern rund 200 chinesische Firmen den nationalen Markt.

Alle großen deutschen Hersteller sind dort aktiv (Produktion und Entwicklung in Deutschland).

In Deutschland sind etwa 12 Mio. Wärmezähler im Einsatz. Die 39 staatlich anerkannten Prüfstellen für Wärme sowie durch Unteraufträge beauftragte Revisionsfirmen und die Eichämter beschäftigen etwa 2100 Mitarbeiter. 2,4 Mio. Wärmezähler/Teilgeräte werden durch dieses Wirtschaftssystem jährlich zur Nacheichung aufbereitet, erst- und nachgeeicht oder sind Gegenstand von Befundprüfungen.

Im Rahmen der Konformitätsbewertungsstelle der PTB führt der Fachbereich 7.5 die verschiedenen gesetzlichen Bewertungen und Zulassungen von Wärme- und Kältezählern durch (Abschnitte 3 und 4) und stellt zu diesem Zweck die Skale der thermischen Energie auf höchstem metrologischen Niveau dar (Abschnitt 5). Zur Verbesserung der Skalendarstellung wird Forschung vor allem im Bereich der optischen Messung von Strömungen (Abschnitt 6) und deren Simulation (Abschnitt 7) in Projekten mit Partnern aus den Hochschulen und der Industrie betrieben.

2. Messgröße Wärme und Wärmezähler

Der Transport „kommerzieller“ Wärme erfolgt durch einen Massenstrom \dot{m} eines Wärmeträgermediums, zumeist Wasser, aber auch Wasser-Glykol-Gemische, seltener Dämpfe, die eine relativ geringe spezifische Wärmekapazität besitzen, oder Salze. Die Abgabe von Wärme an einen Verbraucher erfolgt in einem Kreislauf mittels eines Wärmetauschers. Der Massenstrom \dot{m} tritt mit der Temperatur T_v in den Wärmetauscher ein (Vorlauf), gibt dort einen Teil P seiner Wärmeleistung ab, und fließt mit der Temperatur T_r im Kreislauf zurück (Rücklauf). Die abgegebene Wärmeleistung setzt sich allgemein aus dem Entzug der inneren Energie und der Volumenarbeit des Mediums zusammen, welche in guter Näherung bei konstantem Druck erfolgt [3], sodass sich bei inkompressiblen Medien die Enthalpiedifferenz aus

$$\Delta h(p, T) = c_p(T)(T - T_r), \quad (1)$$

¹ Dr. Karl Jousten, Fachbereich „Wärme und Vakuum“, PTB Braunschweig, E-Mail: karl.jousten@ptb.de

² Dr. Thomas Eichler, Fachbereich „Wärme und Vakuum“, PTB Braunschweig, E-Mail: thomas.eichler@ptb.de

³ Felix Heitmann, Fachbereich „Wärme und Vakuum“, PTB Braunschweig, E-Mail: felix.heitmann@ptb.de

⁴ Dr. Markus Juling, Fachbereich „Wärme und Vakuum“, PTB Braunschweig, E-Mail: markus.juling@ptb.de

⁵ Markus Kühn, Fachbereich „Wärme und Vakuum“, PTB Braunschweig, E-Mail: markus.kuehn@ptb.de

⁶ Dr. Jürgen Rose, Fachbereich „Wärme und Vakuum“, PTB Braunschweig, E-Mail: juergen.rose@ptb.de

⁷ Dr. Jonas Steinbock, Fachbereich „Wärme und Vakuum“, PTB Braunschweig, E-Mail: jonas.steinbock@ptb.de

ergibt. Hierbei ist h die spezifische Enthalpie (Enthalpie pro Masse) H/m und c_p die spezifische Wärmekapazität bei einer geeigneten mittleren Temperatur T . Multipliziert mit dem Massenstrom und integriert über die Zeit t ergibt sich die vom Medium abgegebene ($(T_v - T_r) > 0$) oder dem Medium zugeführte Wärmeenergie ($(T_v - T_r) < 0$):

$$E = \int_{t_1}^{t_2} c_p(T) (T_v(t) - T_r(t)) \dot{m}(t) dt. \quad (2)$$

Da der Massenstrom im stationären Gleichgewicht vor und nach einem Wärmetauscher gleich ist, kann ein Wärmezähler im Vor- oder Rücklauf eines Wärmetauschers installiert werden. Ein Wärmezähler misst jedoch nicht den Massen- sondern den Volumenstrom $\dot{V} = \dot{m} / \rho$, sodass Gl. (2) umgeschrieben werden muss:

$$E = \int_{t_1}^{t_2} k(T_v, T_r) (T_v(t) - T_r(t)) \dot{V} dt \quad (3)$$

Hierbei ist k der Wärmekoeffizient, der explizit von der spezifischen Wärmekapazität und der Dichte des Mediums und implizit von der Vor- und Rücklauftemperatur abhängt. Für das Wärmeträgermedium Wasser lassen sich Zahlenwerte für den Wärmekoeffizienten aus Zustandsgleichungen berechnen. Wärmekoeffizienten anderer flüssiger Wärmeträgermedien entstehen durch kalorimetrische Untersuchungen der Wärmeträger.

Ein Wärmezähler (Bild 1) besteht somit gemäß der technischen Arbeitsgleichung (3) aus drei Teilen:

- dem Volumen- oder Durchflusssensor (hydraulischer Geber) für \dot{V} ;
- dem Temperaturfühlerpaar für T_v und T_r ;
- dem elektronischen Rechenwerk, welches die Wärmekoeffizienten gespeichert hat und die Multiplikation vornimmt.

In Abhängigkeit von der Ausführung können die Teilgeräte untrennbar miteinander verbunden sein oder unter Beachtung der elektrischen Kompatibilität austauschbar aufgebaut sein.

Jedes von den Herstellern angebotene Teilgerät kann auf verschiedenen physikalischen Wirkprinzipien beruhen, deren industrielles Produktspektrum übersichtsweise unter den gängigen Bezeichnungen vorgestellt wird [4]:

Durchflusssensor nach mechanischen Wirkprinzipien (Turbinenradzähler, Ein- und Mehrstrahlflügelradzähler, Woltmanzähler, Stau- und Wirkdruckverfahren mit Blenden, Venturidüsen) sowie nach statischen Wirkprinzipien (magnetisch-induktive und Ultraschall-Verfahren, Wirbelzähler, Schwingstrahlzähler). In der Haustechnik ist ein starker Trend zum Ultraschall-Durchflusssensor zu verzeichnen.

Das *Temperaturfühlerpaar* besteht aus industriellen Platin-Widerstandsthermometern und Messwiderständen gemäß DIN EN 60751 (Pt 100, Pt 500, Pt 1000, Pt 10000), Halbleiterfühlern oder Thermoelementen.

Elektronisches Rechenwerk mit mikroprozessor-gesteuerter Elektronik, speicherprogrammierter und Interrupt-Prozessablaufsteuerung.

3. Gesetzliche Anforderungen an Wärme- und Kältezähler

Für das Inverkehrbringen von Wärmezählern gelten europaweit einheitliche Anforderungen. In Umsetzung der Europäischen Messgeräte-richtlinie (MID) gilt in Deutschland das „Gesetz über das Inverkehrbringen und die Bereitstellung von Messgeräten auf dem Markt, ihre Verwendung und Eichung sowie über Fertigpackungen (Mess- und Eichgesetz – MessEG)“, umgesetzt durch die „Verordnung über das Inverkehrbringen und die Bereitstellung von Messgeräten auf dem Markt sowie über ihre Verwendung und Eichung (Mess- und Eichverordnung – MessEV)“ [5]. Kältezähler sind bezüglich ihres Inverkehrbringens national geregelt, aber bei ihrer Konformitätsuntersuchung gelten dieselben Grundsätze und Fehlergrenzen wie sie bei der Konformitätsuntersuchung zum Nachweis der Einhaltung grundsätzlicher und messgerätespezifischer Anforderungen bei Wärmezählern anzuwenden sind. Im Feldeinsatz müssen thermische Energiemessgeräte, d. h. Wärme- und Kältezähler, die sogenannten Verkehrsfehlergrenzen (VFG) einhalten, die das Doppelte der Eichfehlergrenzen (EFG) betragen.

Bild 1: Heatsonic Ultraschall-Kompakt-Wärmemengenzähler¹; vollständiger Wärmezähler in Kompaktausführung mit Einbau des Rücklauf-Temperaturfühlers im Durchflusssensor-Gehäuse. Mit freundlicher Genehmigung der Meibes System-Technik.



¹ Die Erwähnung von kommerziellen Produkten in Text- oder Bildform geschieht nur zu Informationszwecken und bedeutet in keiner Weise eine Empfehlung der PTB für das Produkt

Die Messung kleiner Temperaturdifferenzen bei Fußbodenheizungen und Klimakälte-Kreisläufen sowie geringer Durchflüsse stellt an den Wärmehändler sehr große Anforderungen. Bedingt durch Unsicherheitsbeiträge der physikalischen Einflussgrößen kann in solchen Fällen die thermische Energie nur mit einer relativen Unsicherheit von 0,4 % gemessen werden.

Die gesetzlich erlaubten VFG für Wärmehändler betragen derzeit bei geringen Durchflüssen und kleinen Temperaturdifferenzen bis 20 %, stark abnehmend hin zu 8 % bei mittleren bis großen Temperaturdifferenzen und Durchflüssen. Diese Maximalgrenzen werden von den Betreibern in der Regel jedoch nicht ausgeschöpft. Eine Feldstudie hat gezeigt, dass im Jahresmittel der typische Messfehler von hochwertigen und korrekt eingebauten Wärmehändlern rund 2 % beträgt [5]. Augenscheinlicher Grund für diese geringe Abweichung ist, dass kleine Durchflüsse und Temperaturdifferenzen über die Heizperiode betrachtet wenig zum Gesamtenergieumsatz beitragen. Auch zeigen Felduntersuchungen, dass weniger als 5 % aller Wärmemengenzähler nach Beendigung der Eichperiode außerhalb der VFG liegen.

Dennoch gibt es bei der Wärmemengenmessung eine Vielzahl zu lösender Probleme: Ziel muss sein, Wärmehändler unempfindlicher gegen die in der Installationspraxis leider häufig festzustellenden und von der Zulassung abweichenden Vorgaben zu machen. Beispielsweise erzeugt eine unzureichende Wärmekopplung zum Temperaturfühlerpaar, strömungsbedingte Volumenmessfehler, außerhalb technischer Richtlinien befindliche chemische Wasserzusammensetzungen sowie Druckdifferenzen zwischen der Vor- und Rücklaufleitung große Messabweichungen. Im Einzelfall können sie viel größer als die erlaubten Verkehrsfehlergrenzen sein.

4. Konformitätsuntersuchungen

Die Arbeitsgruppe „Messung thermischer Energie“ der PTB beschäftigt sich mit Produktprüfungen und Konformitätsuntersuchungen zu allen Bauarten von Wärme- und Kältezählern, deren Teilgeräten und Kombinationen im gesetzlich geregelten Bereich sowie von tragbaren Elektrothermometern. Sie ist Teil der Konformitätsbewertungsstelle der PTB. Sie verantwortet 80 % aller Bauartzulassungen bzw. Konformitätsbewertungen thermischer Energiemessgeräte in Europa und wirkt federführend in allen relevanten nationalen und internationalen Gremien. Ihre messtechnischen Dienstleistungen gliedern sich in Prüfungen nach der Europäischen Messgeräte-Richtlinie 2014/32/EU (MID), Anhang MI-004, für Kältezähler und deren Teilgeräte, kombinierte Wärme- und Kältezähler, tragbare Elektrothermometer nach

MessEG/MessEV, Kalibrierungen von Durchflusssensoren für Wärme- und Kältezähler im Temperaturbereich 3 °C bis 90 °C im Durchflussbereich 6 l/h bis 1000 m³/h für die Wärmeträger Wasser und Wasser-Glykollgemische, Kalibrierungen von Rechenwerken für Wärme- und Kältezähler durch simulierte thermische Energie im Bereich 1 °C bis 200 °C im Durchflussbereich 6 l/h bis 1000 m³/h (Temperaturdifferenzbereich 3 K bis 200 K, Leistungsbereich 14 W bis 236 kW).

Weitere Dienstleistungen sind Beratungen der Industrie und Eichaufsichtsbehörden und von Verbrauchern, messtechnische Untersuchungen und Begutachtungen von Prüfeinrichtungen für Wärme- und Kältezähler sowie Teilgeräte, Fachbegutachtungen von DAkkS-Prüfstellen und Benannten Stellen nach den Modulen F, D und H1.

Die Arbeitsgruppe stellt den Vorsitz in nationalen und internationalen Fach-, Normungs- und Forschungsgremien (CEN TC 176, OIML TC 11, WELMEC, EMATEM e.V., DIN, PTB- und AGME-Arbeitsausschüsse Wärmehändler, *Task Force Laseroptical Flow Diagnostics*). Bei Industrieverbänden sowie deren Arbeitskreisen ist sie regelmäßiges Mitglied. Im Kern ihrer Arbeiten stehen die Erarbeitung technischer Richtlinien und Normen für messtechnische Prüfungen von Wärme-, Kälte- und kombinierten Wärme-Kältezählern, deren Teilgeräten und rückwirkungsfreie Zusatzfunktionen. Beispiele sind die zur MID harmonisierte Fachgrundnorm DIN EN DIN 1434, das normative Dokument OIML R 75 und PTB-Richtlinien [6].

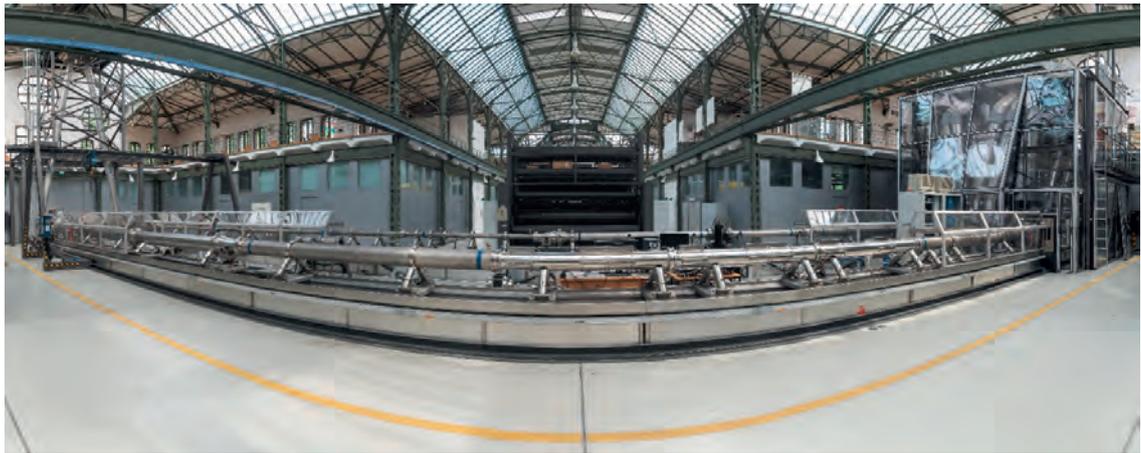
Jährlich erstellt und zertifiziert die Arbeitsgruppe 90 EU-Baumuster- und Entwurf-Prüfbescheinigungen und Revisionen. Nach Aussage der Hersteller besitzen diese Dokumente eine grundlegende Bedeutung für ihren Marktauftritt auch im außereuropäischen Raum, speziell in Russland, China, Indien und im fernöstlichen Raum.

5. Die drei Volumenstrommessanlagen für Wärme

5.1 Wärmehändlerprüfstrecke

Die in den Jahren 2000 bis 2003 errichtete Wärmehändlerprüfstrecke (WZP) ist das Herzstück für die den Volumenstrom messenden Anlagen des Bereichs Wärme der PTB. Sie wird unter anderem für Kalibrierungen, Bauartzulassungen und Forschungstätigkeiten verwendet. Hier werden in erster Linie die Referenzbedingungen bei ungestörten Strömungsbedingungen untersucht und somit die Messabweichung der untersuchten Messgeräte unter besten Bedingungen bestimmt. Darüber hinaus können gestörte Strömungen mittels sogenannter Störkörper erzeugt und die Prüflinge ungünstigen Strömungsbedingungen ausgesetzt

Bild 2:
Die zwei Messstrecken der Wärmezählerprüfstrecke (WZP), links der Hochbehälter, rechts die eingehauste Waage



werden, die zu hohen Messabweichungen führen.

Die WZP (Bild 2) ist eine gravimetrische Normal-Messanlage für den Durchfluss (Medium: Wasser). Durchflussmessgeräte der Nennweiten DN 80 bis DN 400 können verbaut werden. Der einstellbare Temperaturbereich liegt zwischen 5 °C und 85 °C, bei einer maximalen Temperaturdrift im Betrieb von 50 mK/h. Der Durchflussbereich liegt zwischen 3 m³/h und 1000 m³/h. Die maximale nutzbare Länge der Prüfstrecke beträgt 25 m. Die Messunsicherheit für den gesamten darstellbaren Bereich ist < 0,04 % ($k = 2$) [7], [8].

Die Messstrecken der WZP sind in den Nennweiten DN 80, DN 200 und DN 400 doppelwandig ausgeführt, wobei der äußere Bereich unabhängig vom inneren mit temperiertem Anlagenwasser durchströmt wird. Auf diese Weise wird eine homogene Temperaturverteilung auch bei niedrigen Durchflüssen erreicht. Weiterhin sind die Rohrleitungen innen gehohlt und selbstzentrierend, sodass geometrische Einflüsse auf die Prüflinge weitestgehend reduziert werden, und eine gute Wiederholpräzision für die Aufbauten gegeben ist. Zwei physikalisch unabhängige Wägesysteme auf der Basis von Kraft-Kompensationszellen und Dehnmessstreifen, sowie 36 kalibrierte Normal-Gewichte aus Edelstahl sichern die Qualität der Massenbestimmung. Der Wägebühler wird durch zwei Lochplatten-Diverter-Systeme beschickt. Bilaterale Vergleiche zur Bestätigung der Messunsicherheit sind mit dem Hydrodynamischen Prüffeld der PTB sowie dem NMIJ [8] und dem BEV [9] durchgeführt worden.

Die Steuerungs- und Leittechnik der Wärmezählerprüfstrecke wird zurzeit bei laufendem Betrieb modernisiert. Messtechnisch wird die Anlage durch neue IO-Module und zwei mobile Temperaturbäder ergänzt, so dass zukünftig die Simulation von Wärmemessungen zeitgleich mit Volumstrommessungen möglich ist. Die Auswertung von Messungen wird auf ein Python-basiertes Inhouse-System umgestellt, um eine flexible und zukunftssichere Anpassung an neue Messaufgaben und Protokolle zu ermöglichen.

5.2 Haushaltszählerprüfstrecke

Die im Jahr 2000 in Betrieb genommene Haushaltszählerprüfstrecke (Bild 3) ist die für den Haushaltswärmezählerbereich darstellende Durchflussanlage (Medium: Wasser) des Bereichs Wärme der PTB. Sie wird für Kalibrierungen, Konformitätsuntersuchungen und Forschungstätigkeiten verwendet. Unter Referenzbedingungen wird nach dem gravimetrischen Verfahren im Durchflussbereich zwischen 0,006 m³/h und 6 m³/h im Temperaturbereich zwischen 20 °C und 80 °C bei ungestörten Strömungsbedingungen (Prüfstreckenlängen 2,5 m) das messtechnische Verhalten von Durchflusssensoren von Wärmezählern in den Nennweitenbereichen DN 15, DN 20 und DN 25 untersucht. Primärnormale sind drei rückgeführte Waagen der Nennbelastungen 64 kg, 150 kg und 600 kg. Die relative Messunsicherheit im Durchfluss beträgt < 0,1% ($k = 2$) bei einer Stabilität der Medientemperatur von 0,1 K.

Die Bereitstellung unterschiedlicher Medientemperaturen erfolgt durch umschaltbare, temperierte Vorratsbehälter der Nenntemperaturen 20 °C, 50 °C und 80 °C, womit Temperaturwechsel innerhalb von 30 s für Prüfungen schneller ansprechender Wärmezähler ermöglicht werden.

Bedingt durch die messtechnologischen Eigenschaften dieser Wärmezählerprüfstrecke wurden Untersuchungen zur beschleunigten Messbeständigkeitsprognose durchgeführt, deren Ergebnisse Eingang in internationale Normen fanden. Beistellbare Präzisionstemperaturbäder gestatten zudem normgerechte Untersuchungen an vollständigen Wärmezählern.

Es können gestörte Zulaufströmungen mittels Störkörper erzeugt und damit die Prüflinge Strömungsbedingungen ausgesetzt werden, die ihrer Einbaupraxis entsprechen. Die Strömungsbedingungen werden durch die im Fachbereich entwickelten lasergestützten Profilmessverfahren charakterisiert.

Derzeit wird die Steuerungs- und Leittechnik der Haushaltszählerprüfstrecke modernisiert, um

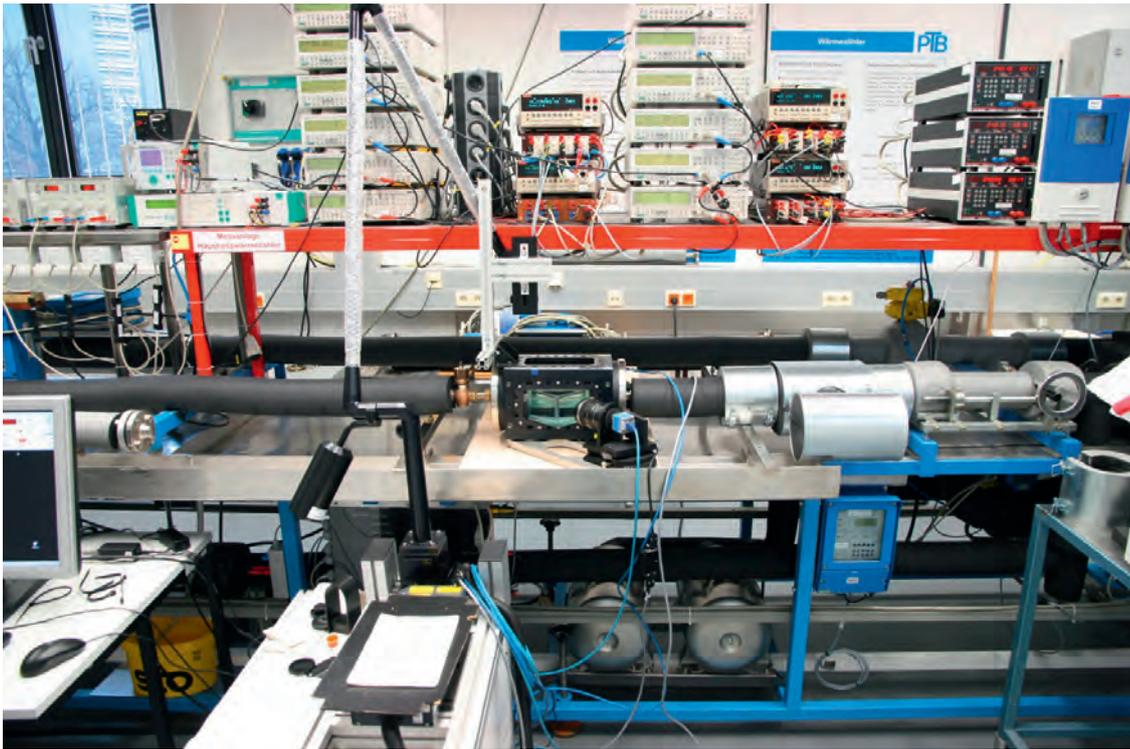


Bild 3:
Haushaltzählerprüfstrecke mit laserassistierter Untersuchungstechnik strömungsprofilbedingender Einflussgrößen auf die Messrichtigkeit

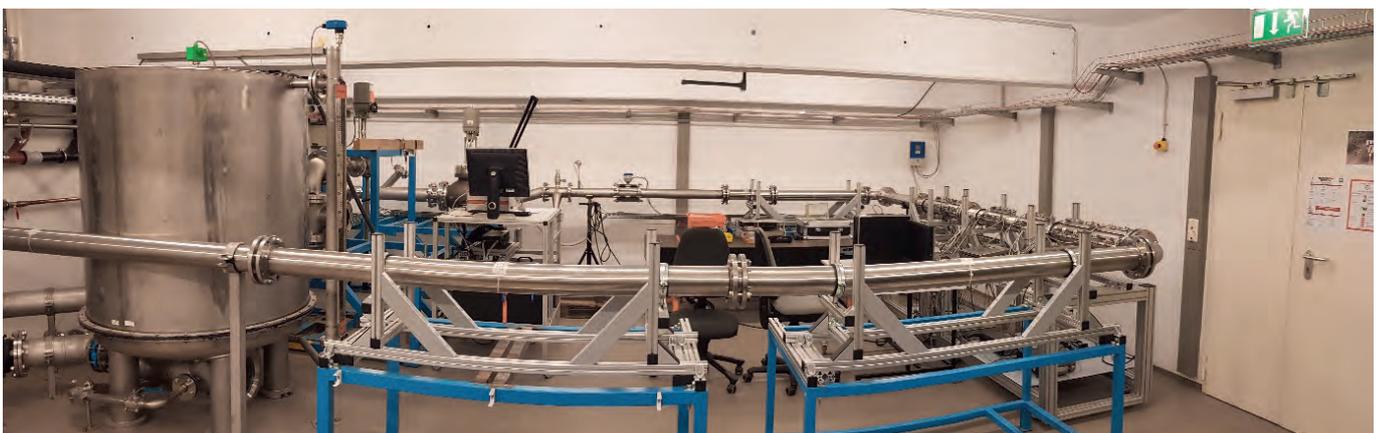
den in Kapitel 8 dargestellten, zukünftigen Anforderungen gerecht zu werden.

5.3 Ultraschall- und Lasermesstechnik-Anlage (LULA)

Ein für die Durchflussmesstechnik entscheidender Unsicherheitsfaktor stellt das Geschwindigkeitsprofil bzw. das Strömungsprofil dar. Ist eine gerade Rohrstrecke lang genug, so entwickelt sich stets ein voll ausgebildetes, gut bekanntes turbulentes Strömungsprofil. In der Praxis werden jedoch selten ideale Bedingungen vorgefunden. Vielmehr erzeugen verschiedene Einbaukonfigurationen ein gestörtes Strömungsprofil. Kenntnisse über die Qualität der Störung sind dabei essenziell zur Verringerung von Messfehlern von Wärme- und Durchflusszählern.

Die Langzeit-Ultraschall- und Lasermesstechnik-Anlage (LULA, Bild 4) dient als Ergänzung zur WZP, um besonders umfangreiche und lang andauernde Untersuchungen bezüglich gestörter Strömungsprofile durchzuführen. Sie nutzt einen magnetisch-induktiven Durchflusssensor (MID), welcher an der WZP kalibriert wird, als Sekundärnormal. Die Messunsicherheit des Volumensstroms liegt bei 0,2 % ($k = 2$). Die Anlage ist für die Dimension DN 100 ausgelegt, es können jedoch auch Nennweiten von DN 50 bis DN 150 installiert werden. Ein besonderer Vorteil dieser Anlage ist die Möglichkeit auch reale Störungen wie 90°-Bogen oder Raumkrümmer zu installieren und so die Prüflinge unter realen Bedingungen zu untersuchen. Diese realen Störungen können mit Störkörpern, wie sie an der WZP verwendet werden, verglichen und verbessert werden.

Bild 4:
Messstrecke der LULA mit eingebautem 90°-Bogen (rechts)



6. Laseroptische Messtechnik

Mittels laseroptischer Messtechnik kann das Geschwindigkeitsfeld in geschlossenen Rohrleitungen ermittelt werden. Hierfür werden optische Zugänge in unterschiedlichen Dimensionen verwendet, die die optische Zugänglichkeit zum Fluid gewährleisten. So kann an bestimmten Orten der Rohrleitung das Geschwindigkeitsprofil des gesamten Rohrquerschnitts vermessen werden. Durch die Installation eines Prüflings am Ort der vorhergegangenen laseroptischen Messung kann dann der Einfluss der vorliegenden Strömungsausprägung auf den Prüfling quantifiziert werden. Hierfür stehen dem Fachbereich die folgenden laseroptischen Messmethoden zur Verfügung.

Bild 5:
LDV-Aufbau mit
optischem Zugang
und LDV-Sonde
in der Dimension
DN 200

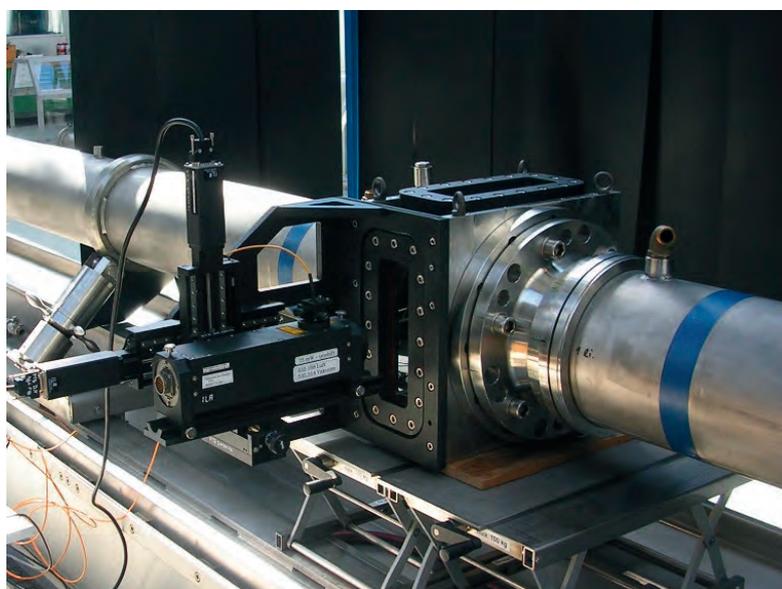


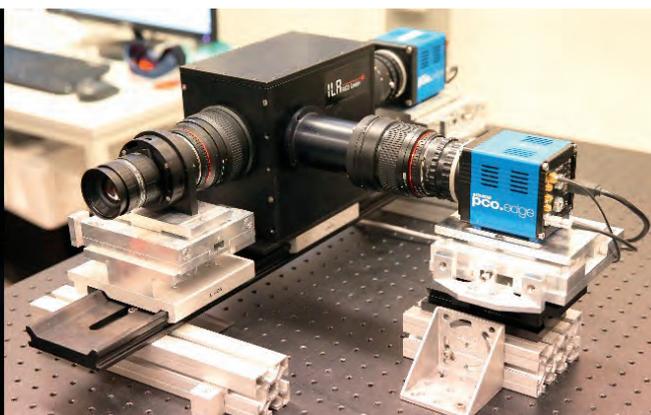
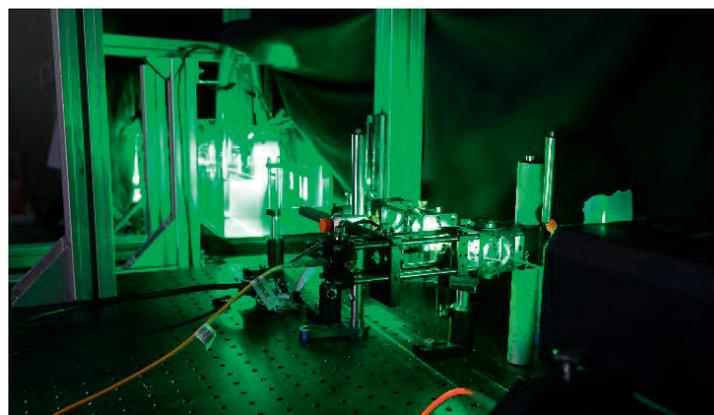
Bild 6:
Laseroptischer Auf-
bau zur Generierung
von Brillouin-Streu-
ung im Wasserbad
(links) und Intensitätsmessung des
gefilterten Lichts
mit Jodzelle und
Kameras (rechts)

a) Laser-Doppler-Velozimetrie

Mit der Laser-Doppler-Velozimetrie (LDV) [10], auch Laser-Doppler-Anemometrie genannt, kann ein Strömungsprofil mit hoher Genauigkeit vermessen werden. Der in Bild 5 dargestellte LDV-Aufbau ermöglicht die Darstellung eines Geschwindigkeitsfeldes mit einer erweiterten

Unsicherheit von 0,4 % ($k = 2$). Das Strömungsprofil wird hierbei punktuell nacheinander vermessen. Dabei werden spezielle Messraster verwendet, die über etwa 500 einzelne, über dem Querschnitt verteilte Messpunkte verfügen. Es wird auch an der Etablierung eines fundamentalen LDV-Normals gearbeitet [11], [12]. Dieser etwas aufwendigere Aufbau ermöglicht um den Faktor 2 geringere Messunsicherheiten. Solch ein Normal ist besonders im Kraftwerkseinsatz von Bedeutung. In thermischen Kraftwerken werden Durchflussmessgeräte häufig unter Bedingungen eingesetzt, die von denen des Prüfstandes während der Kalibrierung deutlich abweichen. So treten vor Ort gestörte Strömungsprofile und höhere Temperaturen (bis 400 °C) auf. Daraus resultieren erhöhte Unsicherheiten des Durchflusses von etwa 2 %, was den zulässigen Durchflussbereich und damit die thermische Leistung einschränkt. Mithilfe des laseroptischen Volumenstrom-Normals (LVN) sollen die Durchflussmessgeräte vor Ort kalibriert werden. Die temperaturempfindliche Positionier- und Lasermesstechnik des LVN ist physisch vom optischen Zugang zur Rohrleitung getrennt, sodass eine Messung bei hohen Temperaturen möglich wird. Dies erfordert jedoch vor jeder Messung die genaue Ausrichtung der Lasersonden zum optischen Zugang. Hierzu wurde ein neuartiges Verfahren entwickelt [13] und patentiert [14], mit dem erstmals die vollautomatisierte Ausrichtung möglich wird.

Eine weitere Forschungsrichtung der PTB mit der LDV ist, diese mit dem neuartigen Messprinzip der gefilterten Brillouin-Streuung (FBS) zu koppeln, um gleichzeitig Temperatur und Volumenstrom des Wärmestroms zu messen. Das FBS-Verfahren basiert auf dem Phänomen, dass Lichteinfall in Wasser neben Reflektionen an makroskopischen Teilchen auch deutlich weniger intensive, aber in der Wellenlänge verschobene, Streuung an Wassermolekülen verursacht – die sogenannte Brillouin-Streuung (Bild 6). Wird das Wasser mit monochromatischem Laserlicht bestrahlt, können mittels eines optischen Filters Reflektionen und andere Störungen ausgeblendet



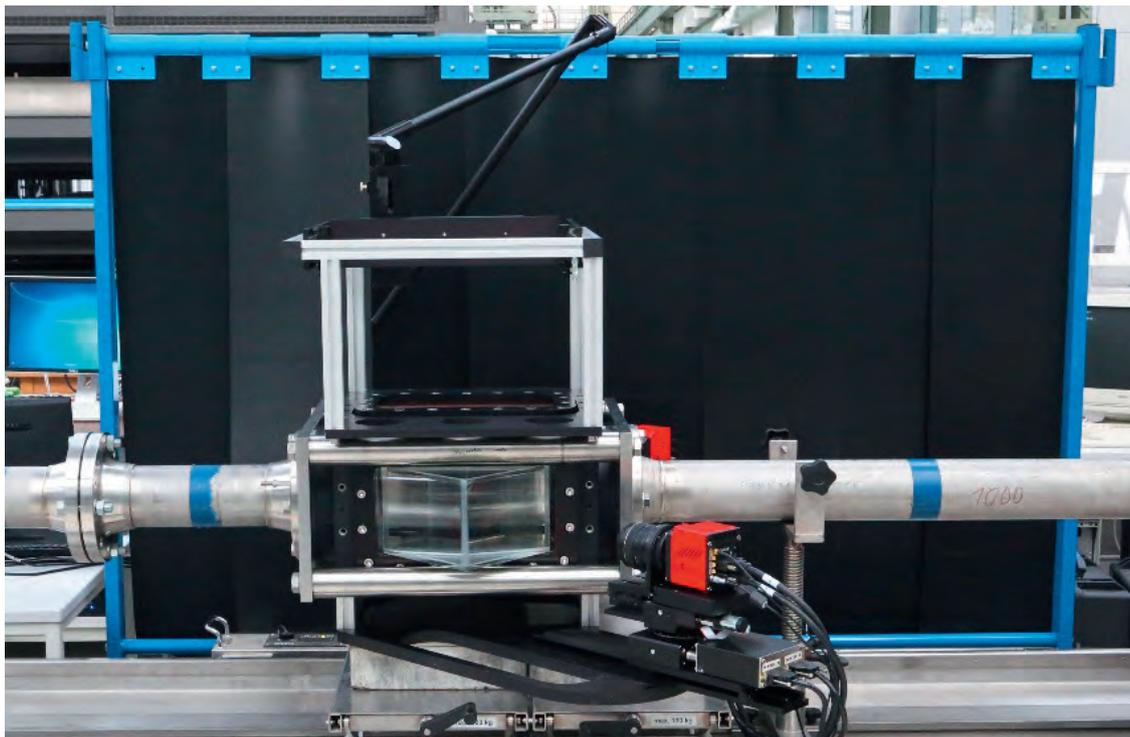


Bild 7:
Stereo-PIV-Aufbau
mit speziellem
optischem Zugang
in der Dimension
DN 100

und nur noch die Streustrahlung erfasst werden. Als Filter fungiert ein mit gasförmigem Jod gefüllter Glaszylinder (die sogenannte Jodzelle), welcher eine von der Wellenlänge abhängige Transmissionskurve aufweist. Die Brillouin-Verschiebung der eingestrahlt Wellenlänge ist unter anderem von der Wassertemperatur abhängig, weshalb hinter dem optischen Filter eine temperaturabhängige Intensitätsänderung des gefilterten Lichtes messbar wird. Daraus kann der Temperaturwert und bei gleichzeitiger Messung der Strömungsgeschwindigkeit mittels LDA der Wärmestrom der Flüssigkeit vollständig bestimmt werden.

Mittels der Laser-Doppler-Velozimetrie ist es möglich, das Geschwindigkeitsprofil einer Strömung rückgeführt auf SI-Einheiten und mit kleiner Unsicherheit zu messen. Allerdings kann zu einem Zeitpunkt nur ein Punkt und nur eine der drei Strömungskomponenten vermessen werden, weswegen für bestimmte Anwendungszwecke ein anderes optisches Verfahren, die Particle-Image-Velozimetrie, eingesetzt wird.

b) Particle-Image-Velozimetrie

Mit der Particle-Image-Velozimetrie (PIV) kann das Strömungsprofil mit einer erweiterten Unsicherheit von etwa 2 % ($k = 2$) vermessen werden. Mit dem in Bild 7 dargestellten Stereo-PIV-Aufbau ist es im Gegensatz zu einem LDV-Aufbau möglich, zu einem Zeitpunkt den kompletten Querschnitt aller drei Strömungskomponenten zu vermessen. Bei einer Messfrequenz von etwa 10 Hz kommt es zu Messzeiten von 100 s, um einen konvergierenden Mittelwert zu erhalten. Diese kurze Messzeit bietet

einen enormen Vorteil bei der Strömungsanalyse und auch bei den zu bereitstellenden Anlagenressourcen. Aktuell finden verschiedene Maßnahmen statt, die im Vergleich zur LDV höhere Unsicherheit zu verbessern, beispielsweise durch neue Methoden der Kalibrierung oder die Kombination beider laseroptischer Verfahren.

7. Computational Fluid Dynamics (CFD)

Um eine umfassende Charakterisierung eines Strömungszustands zu erhalten, kommen neben den laseroptischen Methoden CFD-Methoden zum Einsatz. Hierdurch kann zum einen ein kompletter Strömungsverlauf über längere Strecken der Rohrleitung dargestellt (Bild 8) und zum anderen durch Modellierung des Durchflusssensors die Auswirkung auf das jeweilige Messprinzip bestimmt werden. Es ist auf diese Weise möglich, eine individuelle Einbaukonfiguration durch eine Korrektur zu berücksichtigen und eine Unsicherheitsabschätzung für eine Messung durchzuführen.

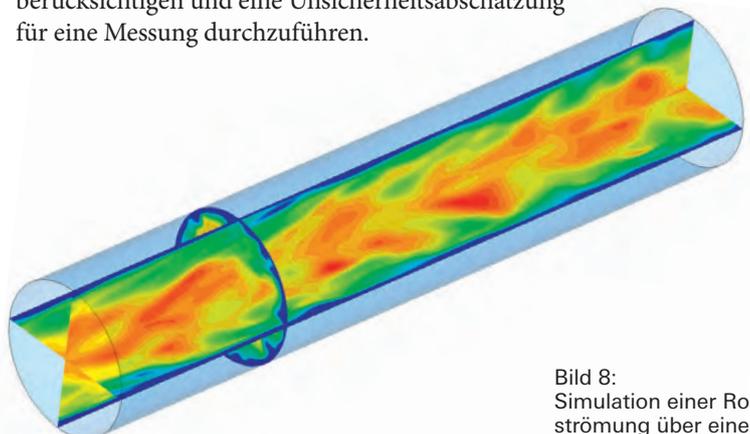


Bild 8:
Simulation einer Rohrströmung über eine Rohrlänge von 5 m

Die Simulation einer turbulenten Strömung beruht auf einer Reihe von Modellannahmen, die nur einen begrenzten Gültigkeitsbereich aufweisen. Eine Validierung der Simulationsergebnisse durch begleitende Experimente ist daher erforderlich. Im Fachbereich wird eine einmalige Kombination aus exakt bekannten Randbedingungen (Durchfluss, Temperatur und Geometrie) sowie präziser optischer Geschwindigkeitsmesstechnik (LDV und PIV) verwendet, um das Ergebnis der Simulation metrologisch abgesichert zu validieren. Durch die stetige Verbesserung der verwendeten Modelle und die steigende Rechenleistung, kommt es auch zu einer stetigen Verbesserung der Simulationen. Hierdurch kann der Aufwand für zeit- und kostenintensive Messungen reduziert werden.

Neben dem Cluster der PTB steht dem Fachbereich eine eigene Recheneinheit zur Verfügung. Hier können Simulationen sowohl auf Haupt- als auch auf Grafikprozessoren durchgeführt werden. Neben der Zeitersparnis auf Grafikprozessoren werden auch verschiedene Modelle auf deren Richtigkeit untersucht.

8. Ausblick

Ein wichtiges Instrument der PTB zur kontinuierlichen Verbesserung der Wärmemesstechnik, und damit zum Verbraucher-, Klima- und Umweltschutz, ist die Durchführung einer Vielzahl von Forschungsvorhaben und Untersuchungen, die mit Partnern aus der Industrie, mit fachlicher Unterstützung durch Eichaufsichtsbehörden sowie nationalen und internationalen Fachgremien durchgeführt werden.

Die Herausforderungen liegen hierbei bei der Messbeständigkeit, den Strömungseinflüssen und der Dynamik auf die Messrichtigkeit von Wärmemessern, bei der verstärkten Ausnutzung der Solarenergie, sowie der Digitalisierung und des Smart Metering.

Bei der Messbeständigkeit geht es um den Einfluss von Ablagerungen [15] sowie der beschleunigten Simulation von Fluss- und Temperaturwechseln. Auch die Dynamik des Wärmeflusses im Anlauf- und Wechselverhalten spielt eine Rolle, besonders auch bei Solaranlagen, wenn auch nicht im gleichen Maße wie bei Wasserzählern. Mithilfe der optischen Messverfahren wird weiterhin der Einfluss der gestörten Strömungen auf die Messergebnisse mit Wärmemessern analysiert werden. Die Entwicklung von Störkörpern, die in geraden Strecken die realen Störungen durch Krümmer nachstellen können, ist ein Entwicklungsziel, bei welchem intensiv Simulationsrechnungen und künftig wohl auch maschinelles Lernen eingesetzt werden.

Bei der Solarenergie und bei Kältezählern liegt eine große Herausforderung im Wasser-Glykol-

Gemisch als Trägermedium begründet, welches in seinen Bestandteilen nicht hinreichend genormt und untersucht ist, sodass die thermophysikalischen Eigenschaften (siehe k -Faktor, Gl. (3)) nicht gesichert sind. Auch hier spielen Ablagerungen eine störende Rolle. Eine weitere Herausforderung in diesem Bereich sind die relativ geringen Temperaturdifferenzen, die für die Temperaturmessung eine höhere Genauigkeit erfordern und für die Analog-Digitalwandler der Rechenwerke höhere Anforderungen zur Linearitäts- und Gleichlaufabweichung stellen. Salzschnmelzen könnten in nächster Zukunft bei Solarthermie-Kraftwerken, aber auch als riesige Energiespeicher an Bedeutung gewinnen. Auch bei diesen Medien können optische Verfahren zur Wärmemessung eingesetzt werden.

Beim Smart-Metering, welches durch sparsamere Tarifierung den Energieverbrauch und den CO₂-Ausstoß vermindern soll, müssen vor allem die logistischen, entwicklungs-, zulassungs- sowie eichtechnischen Voraussetzungen geschaffen werden.

Literatur

- [1] <https://www.ag-energiebilanzen.de>
- [2] *Verordnung über die verbrauchsabhängige Abrechnung der Heiz- und Warmwasserkosten* (Verordnung über Heizkostenabrechnung – HeizkostenV – vom 23.2.1981, Novellierung durch Bekanntgabe 5.10.2009 (BGBl. I S. 3250))
- [3] *Handbuch der Wärmeverbrauchsrechnung*, 4. Auflage, Kap. 2, Franz Adunka, Vulkan-Verlag GmbH, Essen, 2011
- [4] Rose, J.: *Messgeräte für thermische Energie in Wärmetauscher-Kreislaufsystemen*. In: Kreuzberg, J., Wien, W.: *Handbuch der Heizkostenabrechnung*. Werner-Verlag GmbH & Co. KG Düsseldorf, 9. Auflage ISBN 978-3-8041-5461-2
- [5] *Gesetz über das Inverkehrbringen und die Bereitstellung von Messgeräten auf dem Markt, ihre Verwendung und Eichung sowie über Fertigpackungen* (Mess- und Eichgesetz – MessEG) vom 25. Juli 2013, BGBl. I S. 2722, umgesetzt durch Verordnung über das Inverkehrbringen und die Bereitstellung von Messgeräten auf dem Markt sowie über ihre Verwendung und Eichung (Mess- und Eichverordnung – MessEV) vom 1. Januar 2015, BGBl. I S. 2010
- [6] Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Fachbereich Wärme und Vakuum, Arbeitsgruppe Messung thermischer Energie, <https://www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt7/fb-75/ag-751.html>
- [7] Mathies, N.: *Messunsicherheit einer gravimetrischen Kalt- und Warmwasser-Normalmessanlage für große Volumenströme*; Berlin, Technische Universität, 2005, Mensch und Buch Verlag, ISBN 978-3-86664-005-4

- [8] Cordova, L.: *Characterization and validation of the high accurate heat meter calibration facility of the PTB*, Berlin, Technische Universität, 2016, <https://doi.org/10.14279/depositonce-5532>
- [9] Büker, O., Lederer, T., Adunka, F.: *Vergleichsmessungen zwischen Durchfluss-Normalmessanlagen*, Technisches Messen, 79 (2012), DOI 10.1524/teme.2012.0231
- [10] Czarske, J. W.: 2006, *Laser Doppler velocimetry using powerful solid-state light sources*. Measurement Science and Technology. 2006, Bd. 17, 7, S. R71
- [11] Juling, M.: *Rückgeführte Volumenstrommessung mittels orts aufgelöster Laser-Doppler-Anemometrie*; (PTB-Bericht PTB-MA-94); Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2016: (2016), XVI, S. 223, <http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-5170>, ISBN 978-3-95606-298-8
- [12] Steinbock, J. J.: *Aufbau und Validierung eines laseroptischen Normal-Durchfluss-Messgeräts für die metrologische Rückführung einer Hochtemperatur-Prüfanlage*; (PTB-Bericht MA-97); Berlin, Technische Universität, Dissertation, 2017: (2017), XVIII, 116 S, <http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-5970>, ISSN 0179-0595
- [13] *Automatisierte Bestimmung der Position und Ausrichtung des LDA-Messvolumens zum Strömungsquerschnitt*, Heitmann, F., Juling, M., Steinbock, J., Kraume, M.: Experimentelle Strömungsmechanik: 25. Fachtagung, 5.-7. September 2017, Karlsruhe: (2017), 32-1 – 32-8, <http://www.gala-ev.org/images/Beitraege/Beitraege%202017/pdf/32.pdf>, ISSN 2194-2447
- [14] Juling, M.: 2014, *Laser-Durchflussmessgerät und Verfahren zum Kalibrieren eines Laser-Durchflussmessgeräts*, Patent Nr. 10 2014 205 882
- [15] Rodrigues, D.: *Ablagerungen in Wärmehählern*. Neue Entwicklungen der Wärmemessung, Österreichisches Fortbildungsinstitut. Wien, 28./29.10. 2008

Link

- [1] Webseite des Fachbereichs: <https://www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt7/fb-75.html>

Kraftstoffverbrauchsmessung – Anforderungen an die Metrologie

Manfred Werner¹, Günter Hagemann²

1. Motivation

Im automobilen Bereich erfolgen seit vielen Jahren EU-Typgenehmigungen für PKW, LKW und Busse auf Basis von vorgegebenen Testverfahren. Diese umfassen vorgegebene Geschwindigkeit / Zeitprofile, die unter strikten physikalischen Randbedingungen (EUV 715/2007) auf Rollen-Prüfständen, auf der Straße oder nur mit dem Motor auf Motorenprüfständen abgefahren werden.

Der Kraftstoffverbrauch stellt parallel zu den ermittelten CO₂-Werten im Abgastest für den Kunden ein wesentliches Kaufkriterium dar und ist in vielen Ländern die Grundlage für die KFZ-Besteuerung und wird auch für das staatliche Monitoring der klimaschädlichen CO₂-Emissionen genutzt.

NO_x- sowie Feinstaub-Werte sind ebenfalls in der Diskussion für direkte Luftverschmutzung im städtischen Bereich, darunter insbesondere der Einfluss des einzelnen Antriebes auf Werte > 40 µg/m³-Grenzwert an den städtischen Luft-Messstationen.

Im maritimen Bereich findet sich eine ähnliche Situation. Für diesen werden von der IMO (Internationale Seeschiffahrt Organisation) immer geringere Schadstoffemissionen im Schiffsbetrieb gefordert. Seit 2016 gelten in bestimmten Zonen (*Emission Control Areas*: US-Küsten, Nord- und Ostsee) Grenzwerte für Stickoxid- und Schwefel-Emissionen (*Marpol: Marine-Pollution*) vergleichbar zu denen für Nutzfahrzeuge im Straßenverkehr. Mit dem Ziel, im Seeverkehr die CO₂-Emissionen kostenwirksam zu reduzieren, ist seit Juli 2015 eine europäische Verordnung in Kraft, die ein verbindliches MRV-System (*Monitoring, Reporting und Verification*) zur Prüfung von CO₂-Emissionen beinhaltet.

In allen Applikationen „rund um den Verbrennungsmotor“, sei es bei der Kalibrierung von Steuergeräten am realen sowie virtuellen Prüfstand, beim Abfahren von Fahrzyklen auf Fahrzeugprüfständen, der Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs im realen Fahrbetrieb sowie bei der Nutzung von Experten- und Assistenz-Systemen zur Steigerung der CO₂-Effizienz im Schiffsbetrieb, ist eine

genaue Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs unerlässlich.

Doch sind die derzeit vorgegebenen Methoden und Regelwerke zur Verbrauchsbestimmung im Sinne der Aufgabenstellungen applikationskonform?

Im folgenden Beitrag wird am Beispiel des Dieselmotors aufgezeigt, wie Kraftstoffverbräuche im automobilen und maritimen Bereich bestimmt werden, welche Regelwerke die Grundlage dazu bieten und welche Verbesserungspotenziale genutzt werden können.

2. Regelwerke für Verbrauchsmessungen im Automobilbereich

In den Regelwerken US EPA CFR 1065 sowie der Europäischen Variante EU-Richtlinie Nr. 1152 und 1153/ 2017 sind die Regularien für die Homologierung von Fahrzeugen sowie auch die Anforderungen an Messgeräte in Verbindung mit *Emission Certification Test Runs* beschrieben. In diesen Regelwerken sind, außer den Vorgaben zur Durchführung der Zyklen, auch die Anforderungen an die zu verwendenden Messgeräte vorgegeben. Bild 1 zeigt einen Auszug für relevante Werte für Messgeräte aus der US EPA 40 CFR § 1065. Diese Werte sind nahezu identisch zu den Anforderungen aus der UN ECE R49 (*Economic Commission for Europe of the United Nations*). Hinsichtlich der Adaption der Messgeräte sind nur allgemeine Hinweise zur Beachtung angeführt. Weder die quantitativen Forderungen hinsichtlich der empfohlenen Werte noch deren isolierte Betrachtungsweise bezogen auf die Messgeräte allein decken sich mit den tatsächlichen Anforderungen an Verbrauchsmessungen am Motor. Wie noch im Folgenden weiter ausgeführt, ist bei Messungen am Motor im Motorprüffeld, sei es bei der Applikation von Steuergeräten oder beim Abfahren von Prüfzyklen, die Genauigkeit von Relevanz, mit der die Kraftstoffmenge, die im Motor verbrannt wird, bestimmt wird. Hierbei sind alle Einflussgrößen auf die Messergebnisse im Sinne einer Gesamtmessunsicherheitsbetrachtung zu bewerten.

¹ Manfred Werner, IB-HAWE Ing.-Büro für automobiler Aggregateprüftechnik, E-Mail: mw1903-1@ib.hawe.de

² Günter Hagemann, IB-HAWE Ing.-Büro für automobiler Aggregateprüftechnik, E-Mail: gh1903-1@ib.hawe.de

Measurement Instrument	Measured quantity symbol	Complete System Rise time (t_{10-90}) and Fall time (t_{90-10}) ^a	Recording update frequency	Accuracy ^b	Repeatability ^b	Noise ^b
Fuel flow meter (Fuel totalizer)	m	5 s (N/A)	1 Hz (N/A)	20 % of pt or 1.5 % of max	1.0 % of pt or 0.75 % of max	0.5 % of pt max

Bild 1:
Auszug aus der
US EPA 40 CFR §
1065.205 mit Anforderungen an „Fuel Flow Meter“

3. Methoden in der Motoren- und Fahrzeugentwicklung

Bei nahezu allen Kraftstoffsystemen erfolgt die äußere Gemischbildung (Zumessung der Kraftstoffmenge) mittels elektromagnetisch oder hydraulisch betriebener Einspritzventile. Mit mehreren Einspritzungen pro Arbeitsspiel wird bei der inneren Gemischbildung das Motorkennfeld ermittelt und in der ECU (Engine Control Unit) abgespeichert. In Bild 2 ist der Prozess dargestellt.

Weiterhin fließen in die Abstimmung weitere Kennfelder und Kennlinien von Sensoren ein, die in der Summe zu einem übermäßigen Umfang der Versuchsarbeiten führen würde. Um eine effiziente Abstimmung zu gewährleisten, werden deshalb Abstimmungen modellbasiert mittels DoE-Versuchsplanungen (Design of Experiment) durchgeführt. In Bild 3 ist die Vorgehensweise dargestellt.

Auf dem realen Prüfstand wird mit der DoE-Versuchsplanung eine „überschaubare“ Anzahl charakteristischer Messpunkte im Kennfeld des Motors bzw. als Komponente im „in the loop“-Verfahren ermittelt und im realen Motorbetrieb überprüft. Mithilfe des virtuellen Prüfstandes erfolgt dann die Bedatung des gesamten Kennfeldes. Das Ziel dieser Vorgehensweise ist es, den Messaufwand am realen Motor und / oder Fahrzeug zu minimieren und um möglichst genaue Voraussagen zum Kraftstoffverbrauch und zu Schadstoffemissionen zu treffen sowie motorische Stellgrößen vorzugeben bzw. diese zu optimieren. Eine Validierung dieser modellbasierten Abstimmungen erfolgt anschließend am Rollen- oder Fahrzeugprüfstand.

Welche Forderungen ergeben sich hieraus für die Qualität der Messungen?

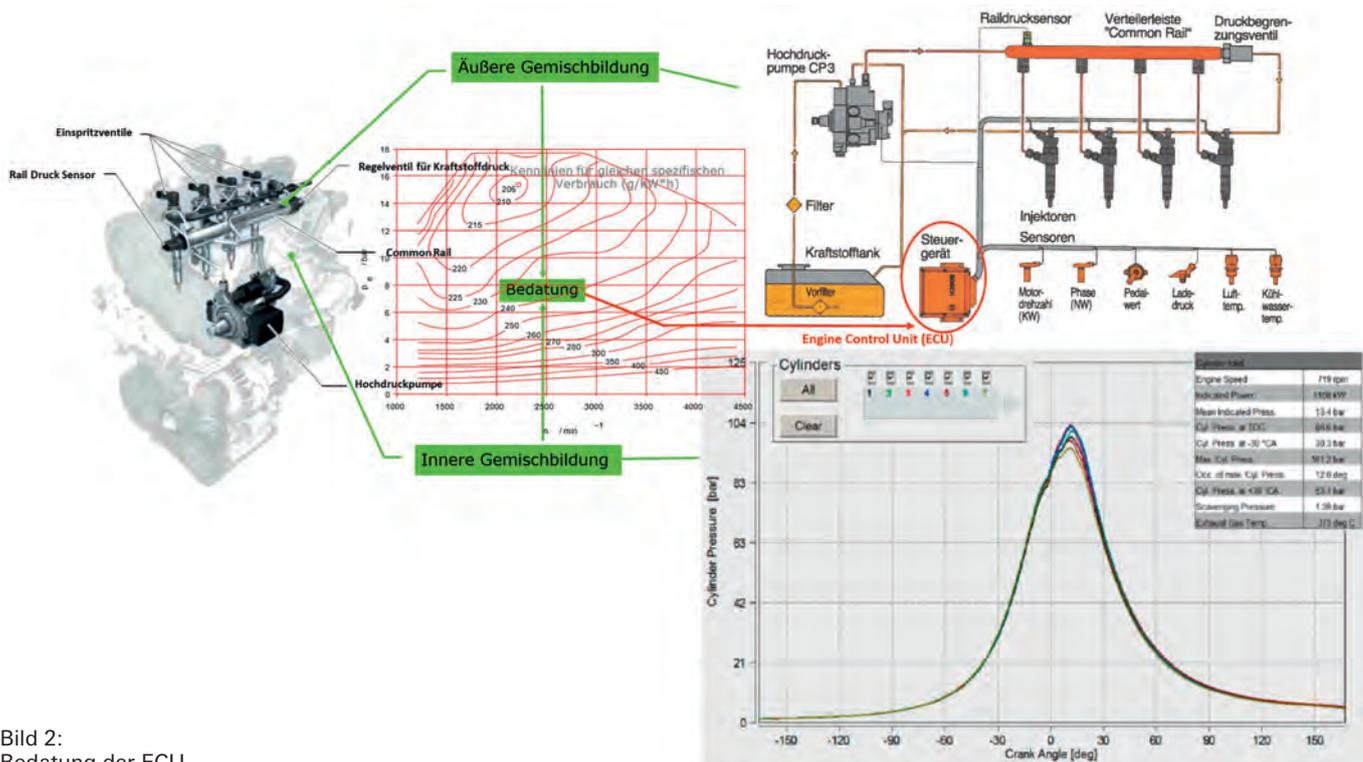


Bild 2:
Bedatung der ECU

Virtueller Prüfstand als Ergänzung zum realen Prüfstand

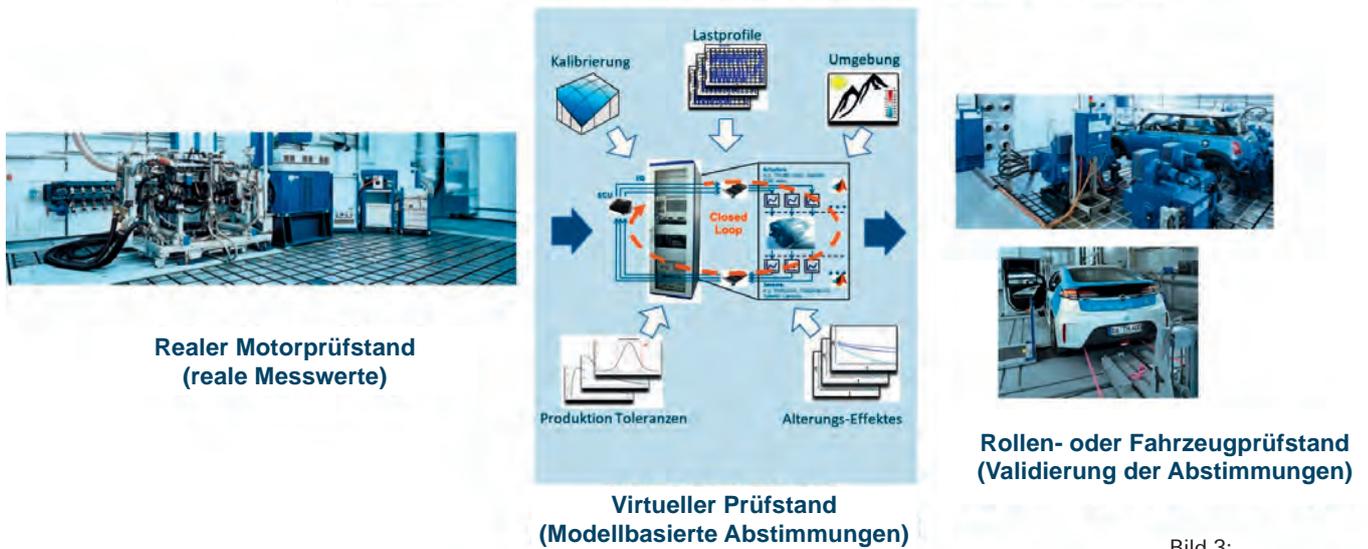


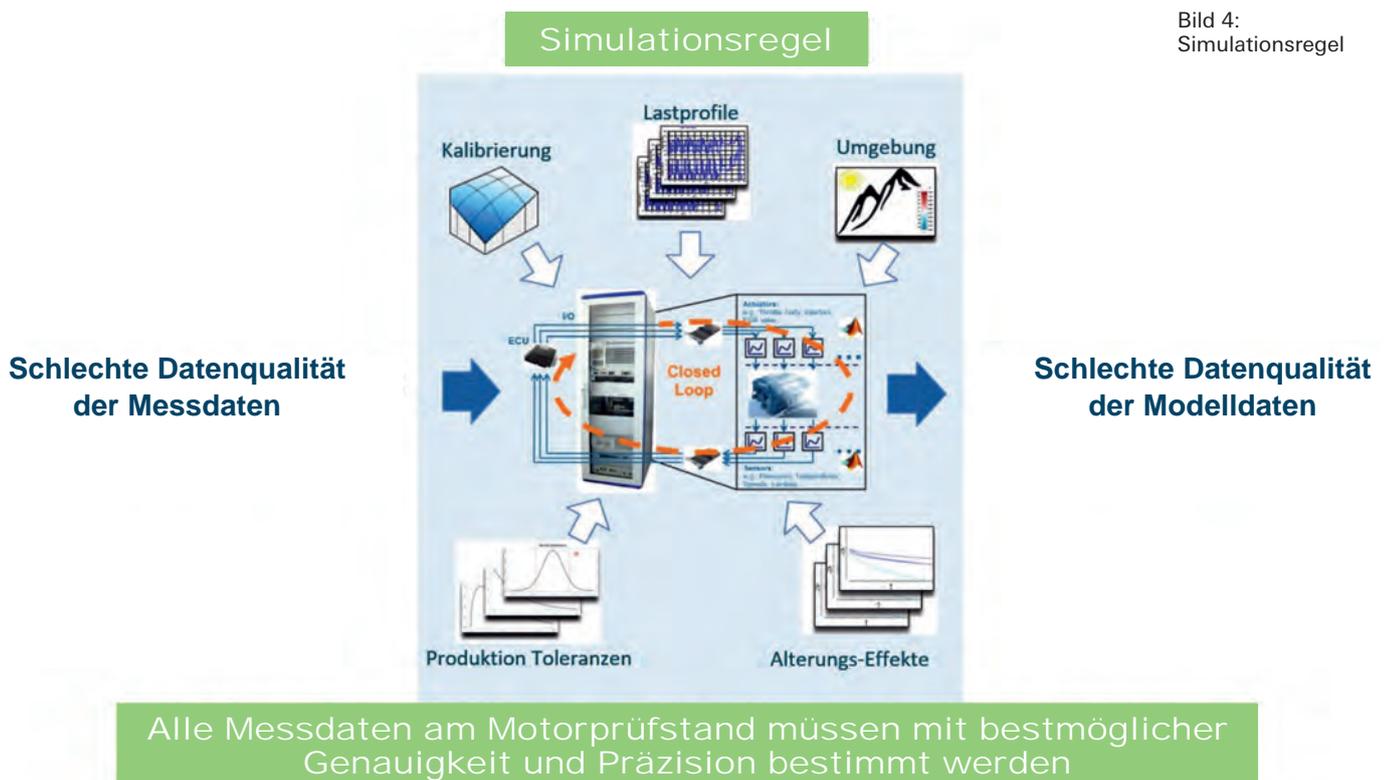
Bild 3: Virtueller Prüfstand für eine modellbasierte Abstimmung [1]

4. Simulationsregel

Wie in Bild 4 dargestellt, führt eine schlechte Qualität von Messdaten zu einer schlechten Datenqualität der Modelldaten. Hieraus ist abzuleiten, dass die am realen Motor zu ermittelnden Messwerte mit bestmöglicher Präzision und Richtigkeit bestimmt werden müssen. Mit einer Datenqualität der Messdaten gemäß den Forderungen aus der US EPA 40 CFR § 1065 sowie der EU-Richtlinie Nr. 1152 und 1153/ 2015 wäre eine effiziente Abstimmung von Motorsteuergeräten nicht mög-

lich. Die deutsche Automobilindustrie fordert deshalb eine ganzheitliche Betrachtung der Messaufgabe mit klarer Angabe zu zu erreichenden Gesamtmessunsicherheiten für Verbrauchswerte unter realen Betriebsbedingungen am befeuerten Motor. In kooperativer Zusammenarbeit mit ausgesuchten Messgeräteherstellern sind komplexe Messsysteme entstanden, die diese Forderungen erfüllen und mit standardisierter Ausführung dieser Systeme einen effizienten Entwicklungsbetrieb gewährleisten.

Bild 4: Simulationsregel



5. Messsysteme für den Einsatz im Motor- und Fahrzeug-Prüffeld

Kernforderungen für die Ausführung solcher Systeme sind:

- Die Kraftstoffverbrauchsmessung ist neben der Lieferung erforderlicher Komponenten als Gesamtaufgabe zu verstehen.
- Mit dem Kraftstoffmesssystem ist kontinuierlich der Kraftstoff am Motorprüfstand zu konditionieren, der Verbrauch zu messen und statistisch behandelt an das Prüfstands-Daten- und Automatisierungssystem über relevante Schnittstellen zu übergeben.
- Die erreichbaren Gesamtmessunsicherheiten bezogen auf den momentanen Verbrauchswert unter realen Betriebsbedingungen am laufenden Motor sind nach DIN EN 14185-2015 rückführbar auf nationale Normale zu belegen und durch entsprechende Dokumente nachzuweisen.
- Die Messeinrichtung muss zugelassen sein für Messungen nach:
 - ▷ US EPA 40 CFR § 1065 / 1066;
 - ▷ EU, UN-ECE Nr.1152 / 1153 / 2017;
 - ▷ ISO 8178-4-2017.

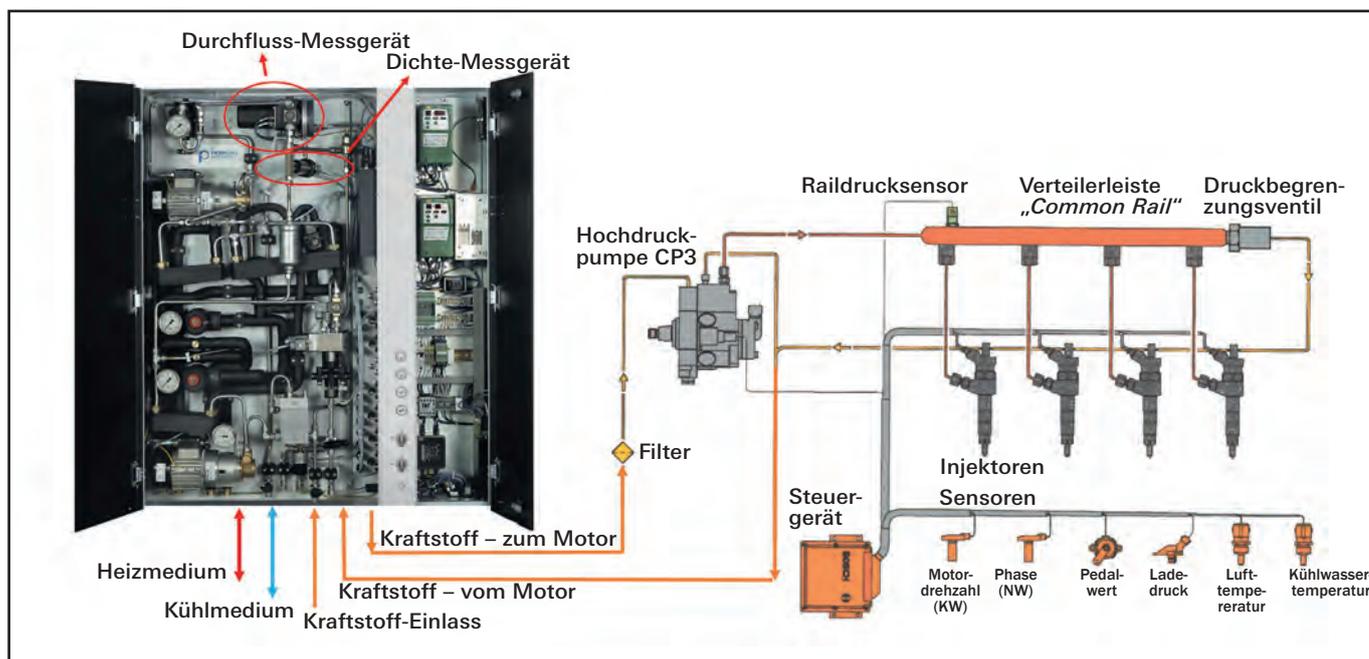
Diese Forderungen der US- und EU-Regulierungen sind nur mit einer standardisierten Systemarchitektur zu realisieren, insbesondere um die Forderungen zur Angabe der Gesamtmessunsicherheit

der Messung auch am laufenden Motor erfüllen zu können. Bild 5 zeigt beispielhaft die Anbindung solcher Systeme an den Motor.

Die Kraftstoffversorgung des Prüfstandsystems erfolgt aus der Infrastruktur des Prüffeldes, ebenso die Versorgung mit Medien zur Temperierung des Kraftstoffes. Das Messsystem übernimmt sowohl die Versorgung des Motors als auch die Aufnahme des Rücklaufs vom Motor, beides unter Einhaltung motorspezifischer Parameter, die vom Automatisierungssystem des Prüfstandes vorgegeben werden.

Wie aus Bild 6 ersichtlich, wird mittels einer Booster-Pumpe der Kraftstoff zum Kraftstoffsystem des Motors gefördert. Der Druck in diesem Bereich wird mit einem Auslass-Druckregler eingestellt. Der Rücklauf vom Motor gelangt zurück vor die Booster-Pumpe. Der Druck im Rücklauf wird über den Rücklauf-Druckregler bestimmt. Die Einstellung der Kraftstofftemperatur erfolgt mittels Wärmetauschers über die Kraftstoff-Auslasskonditionierung. Die entsprechenden Parameter werden über die Steuerung des Prüfstandes vorgegeben. Vom Durchflussmessgerät wird die in den Messkreis nachfließende Kraftstoffmenge kontinuierlich erfasst. Die Erfassungszeiten (Messzeiten) zur Auswertung des Durchflusses sind applikationsabhängig und liegen zwischen 1 Hz für stationäre Messungen bis 100 Hz für dynamische Messungen. Die Vorlaufdrücke zum Motor sind typischerweise zwischen -100 mbar bis 10 bar einstellbar, die Rücklaufdrücke zwischen 10 mbar und 2 bar. Typische Kraftstofftemperaturen betragen am Eintritt in den Motor zwischen 14 °C – 23 °C (Otto-Kraftstoffe) und 45 °C (Dieselkraftstoffe), je nach Versuchsbedingungen der Applikation. Realisierte Messbereiche liegen zwischen 0,15 kg/h (ca. 0,2 l/h) bis 175 kg/h (ca. 220 l/h), die mit einem Durchflussmessgerät erreicht werden.

Bild 5: Kraftstoffverbrauchs- und Messsystem am Motorprüfstand



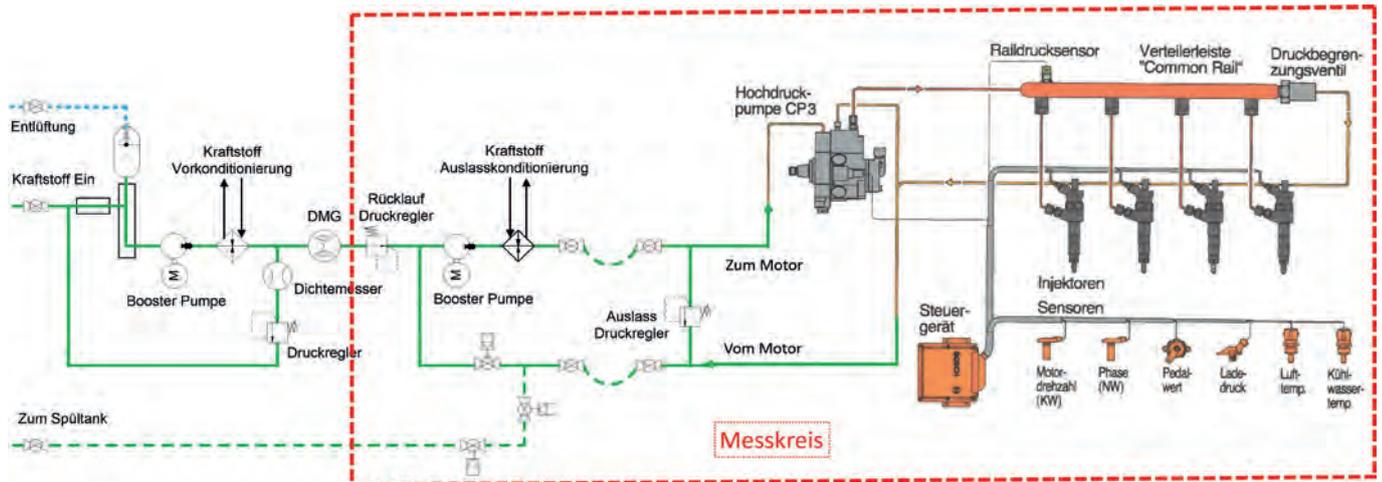


Bild 6: Funktion des Kraftstoffverbrauchsmesssystems im Kraftstoffsystem des Motors

Alle Parameter werden vom Automatisierungssystem des Prüfstandes vorgegeben und von der Steuerung des Messsystems mit der erforderlichen Regelgüte eingestellt.

Hinter dem Durchflussmessgerät und dem Dichtemesser sind Menge und In-situ-Dichte des Kraftstoffs gemessen. Ab hier beginnt der sogenannte Messkreis mit Relevanz für eine Bewertung der erreichbaren Gesamtmessunsicherheit.

6. Nachweis der Gesamtmessunsicherheit

Wie in Bild 7 dargestellt, wird die Gesamtmessunsicherheit der in den Motor gelangenden Kraftstoffmenge nicht nur vom Messsystem beeinflusst, sondern auch vom Motor, der Prüfstandsumgebung sowie dem Kraftstoffsystem zur äußeren Gemischbildung.

Messsysteme dieser Art kommen weltweit bei fast allen Automobilherstellern an Prüfständen zur Motoren- und Fahrzeugentwicklung zum Einsatz. Die Standardisierung der Systemarchitektur mit Forderungen zum Nachweis einzuhaltender Gesamtmessunsicherheiten garantiert eine hohe Vergleichbarkeit von Messergebnissen. Dies ist von besonderer Bedeutung, da vielfach Motoren in Stammwerken entwickelt werden und an unterschiedlichen Standorten von Mitarbeitern unterschiedlicher beruflicher Qualität produziert werden. Deshalb sind auch die Konzepte, mit der Messsysteme im Prüffeld hinsichtlich der Messbereitschaft mit entsprechender Messqualität überprüft werden können, standardisiert. Zur Abschätzung der Gesamtmessunsicherheit sind die in Bild 8 dargestellten Einflussgrößen mit den zum Ansatz kommenden Standardunsicherheiten festgelegt.

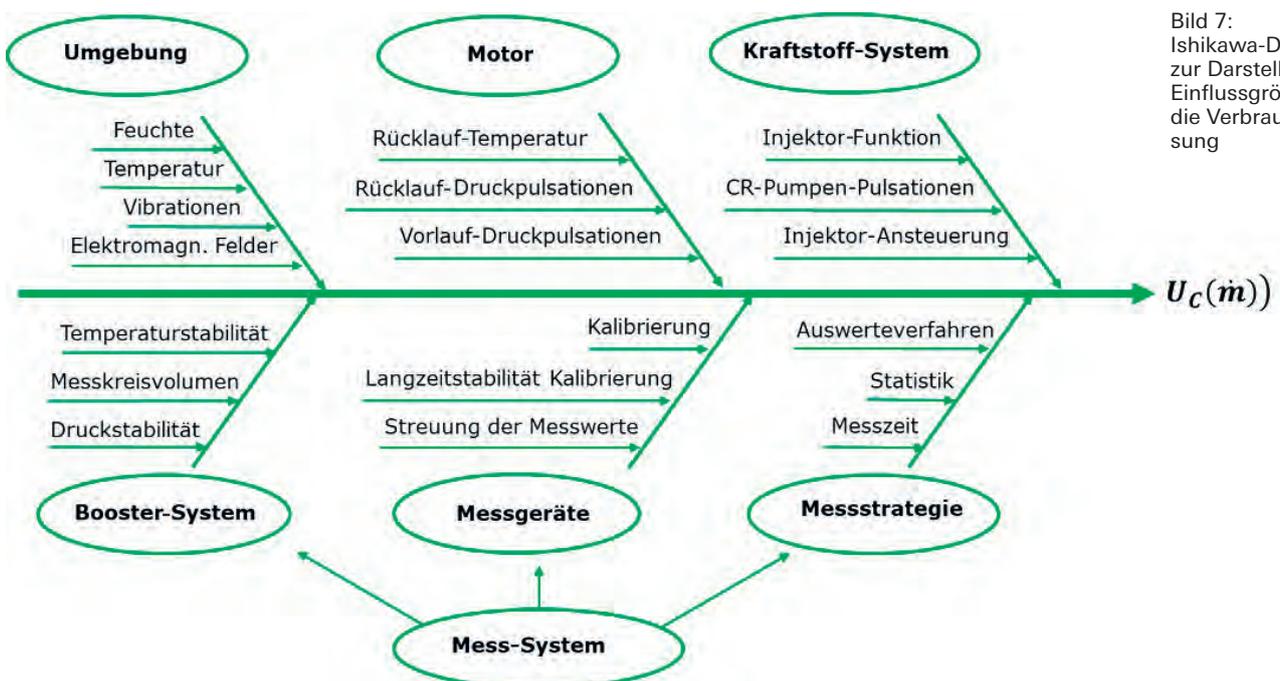


Bild 7: Ishikawa-Diagramm zur Darstellung der Einflussgrößen auf die Verbrauchsmessung

$$u_c(\dot{m}) = \sqrt{u_K^2 + u_L^2 + u_S^2 + u_D^2 + u_T^2} \text{ (Gesamtmessunsicherheit)}$$

$$U_c(\dot{m}) = u_c(\dot{m}) \times 2 \text{ (Erweiterte Gesamtmessunsicherheit } \approx 95\% \text{ Wahrscheinlichkeit)}$$

$u_K = \text{Einfluss der Kalibrierung}$
 $u_L = \text{Einfluss der Langzeitstabilität der Kalibrierung}$
 $u_S = \text{Einfluss der Streuung der Messwerte (Standardabweichung)} (u_S = f(t, \dot{m}))$
 $u_S = \frac{s}{\sqrt{n}} : t = 1s, n = 10 \text{ (Gleitender Mittelwert)}$
 $u_T = \text{Einfluss der Temperatur im Messkreis (Scheindurchfluss)}$
 $u_T = \frac{\dot{m}_{\text{Scheindurchfluss}}}{\dot{m}} = \frac{dT}{dt} \times \beta \times \frac{V_{\text{Messkreis}}}{\dot{m}}$
 $u_D = \text{Einfluss der Dichte (bei volumetrischer Messung)}$

Bild 8: Relevante Einflussgrößen auf die Gesamtmessunsicherheit

Besondere Bedeutung erlangt hier die Temperaturstabilität im gesamten Messkreis, die insbesondere bei kleinen Verbrauchsmengen im leerlaufnahen Bereich bis hinunter auf ca. 0,15 kg/h die Gesamtmessunsicherheit dominiert, sowie der Einfluss der Messwertstreuungen.

In Bild 9 sind die bei der Abnahme der Systeme nachzuweisenden Standardunsicherheiten mit der sich daraus ergebenden Gesamtmessunsicherheit als Übersicht dargestellt.

Die mit der installierten Anlage erreichten Gesamtmessunsicherheiten sind bei der Abnahme des Systems als Funktion der Messzeit und des Durchflusses nachzuweisen. Als Richtwert ist dabei der Kennfeldpunkt der Gesamtmessunsicherheit (GUM, k=2) von $\leq 0,5\%$ bei einer Messzeit von $\leq 1\text{ s}$ und einem Durchfluss von $\leq 1\text{ kg/h}$ zu bewerten.

7. Instationäre Messungen

Die Validierung der am virtuellen Prüfstand durchgeführten modellbasierten Abstimmung erfolgt, wie in Bild 3 dargestellt, auf Fahrzeug- oder Rollenprüf-

ständen. Hierbei werden die in den Regelwerken exakt definierten Fahrzyklen rechnergestützt abgefahren und die Schadstoffemissionen auf Konformität mit den gesetzlich vorgegebenen Grenzwerten überprüft. In Bild 10 ist beispielhaft der Kraftstoffverbrauch über einen WHTC-Zyklus dargestellt, der für NFZ-Nutzfahrzeuge appliziert wird.

Die gesamte Zyklusdauer beträgt 1800 s, wobei in der Regel alle 100 ms von allen relevanten Motorparametern Messungen ausgewertet und dargestellt werden. Die Aufnahme der Daten beginnt im Leerlauf des Motors und endet im Leerlauf, nachdem der Motor sich stabilisiert hat. Ausgewertet werden für alle Messgrößen primär die akkumulierten Werte, wobei qualitativ auch instationäre Phasen im Zyklus betrachtet werden. In Bild 11 ist beispielhaft der in Bild 10 grün markierte Ausschnitt einer „Schubabschaltung“ gezeigt.

Wie in Bild 11 (rot gestrichelte Linie) dargestellt, wird im Schubbetrieb der Kraftstoff von der ECU auf „Null“ gefahren. Der Vorgang dauert ca. 2,4 s. Man erkennt, dass der tatsächlich gemessene Verbrauch zunächst, bedingt durch das Zeitver-

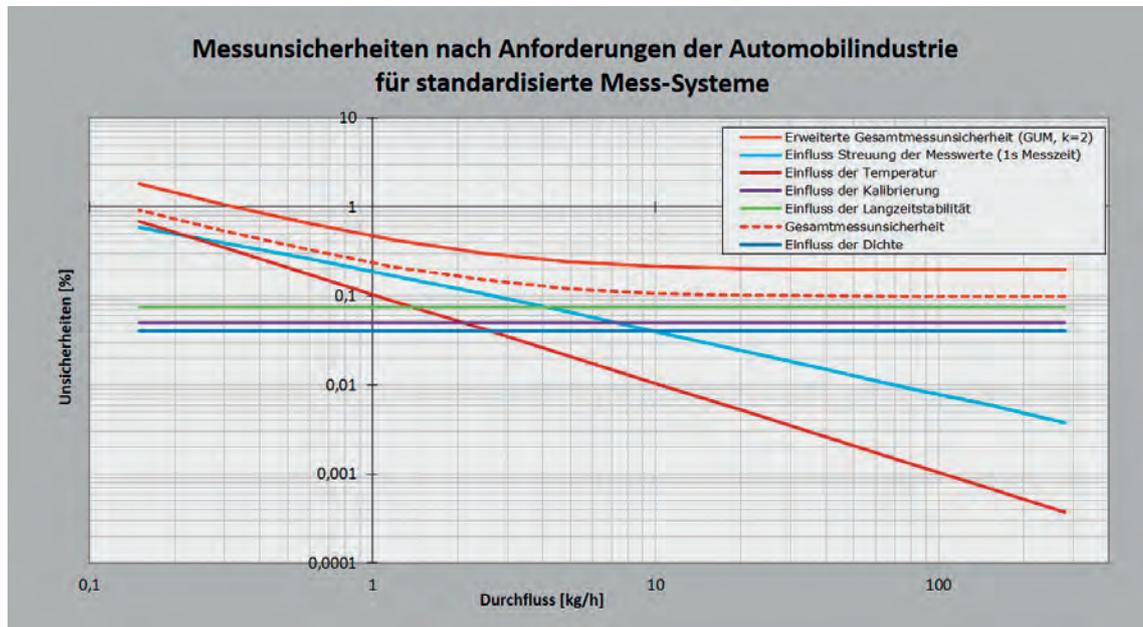


Bild 9: Nachweis der Gesamtmessunsicherheit

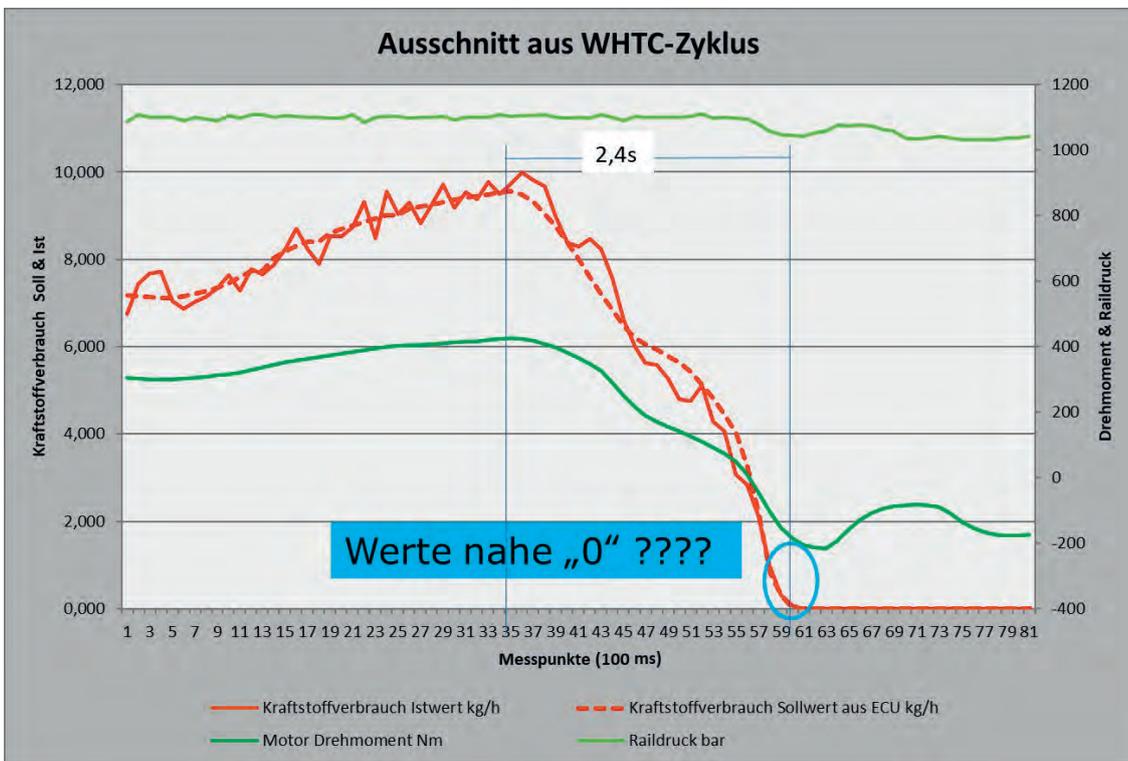
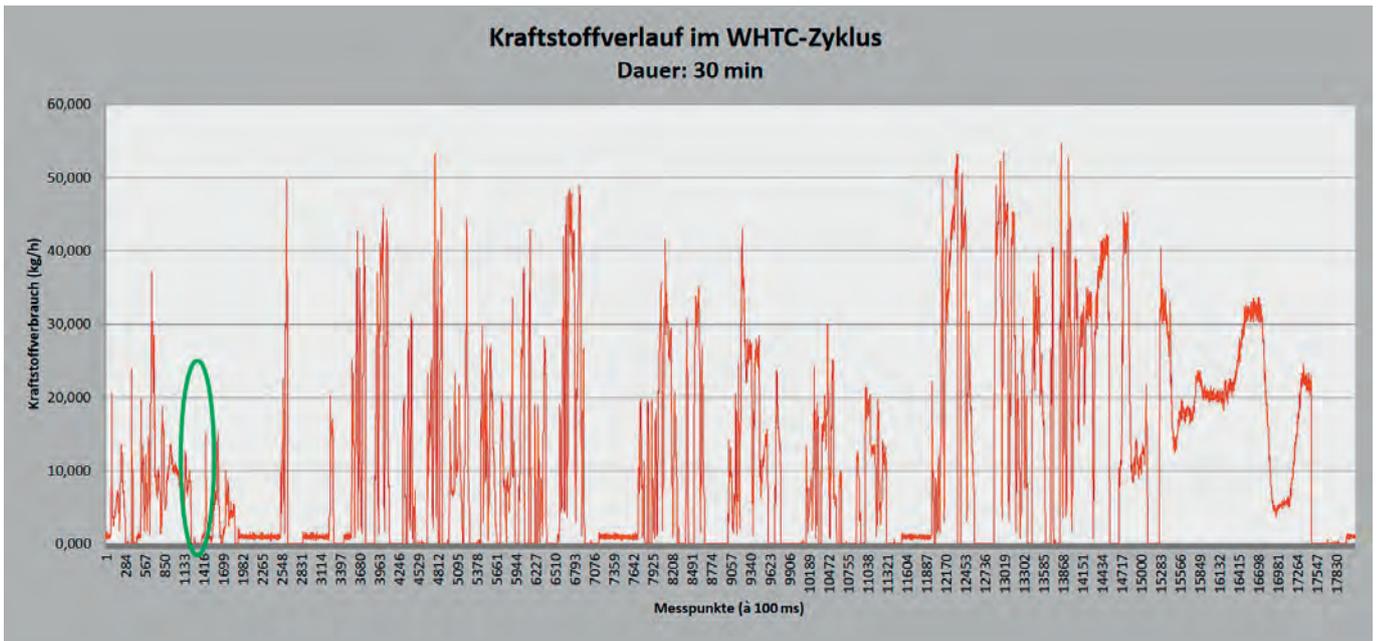


Bild 10: Kraftstoffverbrauch im WHTC-Zyklus

Bild 11: Ausschnitt aus einem WHTC-Zyklus

ten des gesamten Kraftstoffpfades (nicht nur des Messgerätes), dem Zyklus nur tendenziell folgen kann. Erst in den letzten „Millisekunden“ ist eine gute Übereinstimmung zwischen Soll- und Istwert erkennbar. Der gemessene Verbrauch geht mit dem Sollwert gegen Null.

Das bei diesen Messungen eingesetzte Messsystem hat eine T90-Zeit von ca. 60 ms und ist deshalb dazu geeignet, solche Vorgänge qualitativ darzustellen. Das im System integrierte Durchflussmessgerät ist ein Verdrängerzähler, der drehzahlproportional bis „Null“ Impulse liefert. Die Kalibrierung endet aber im unteren Messbereich bei 0,2 l/h. Hier verbirgt sich die Möglichkeit von

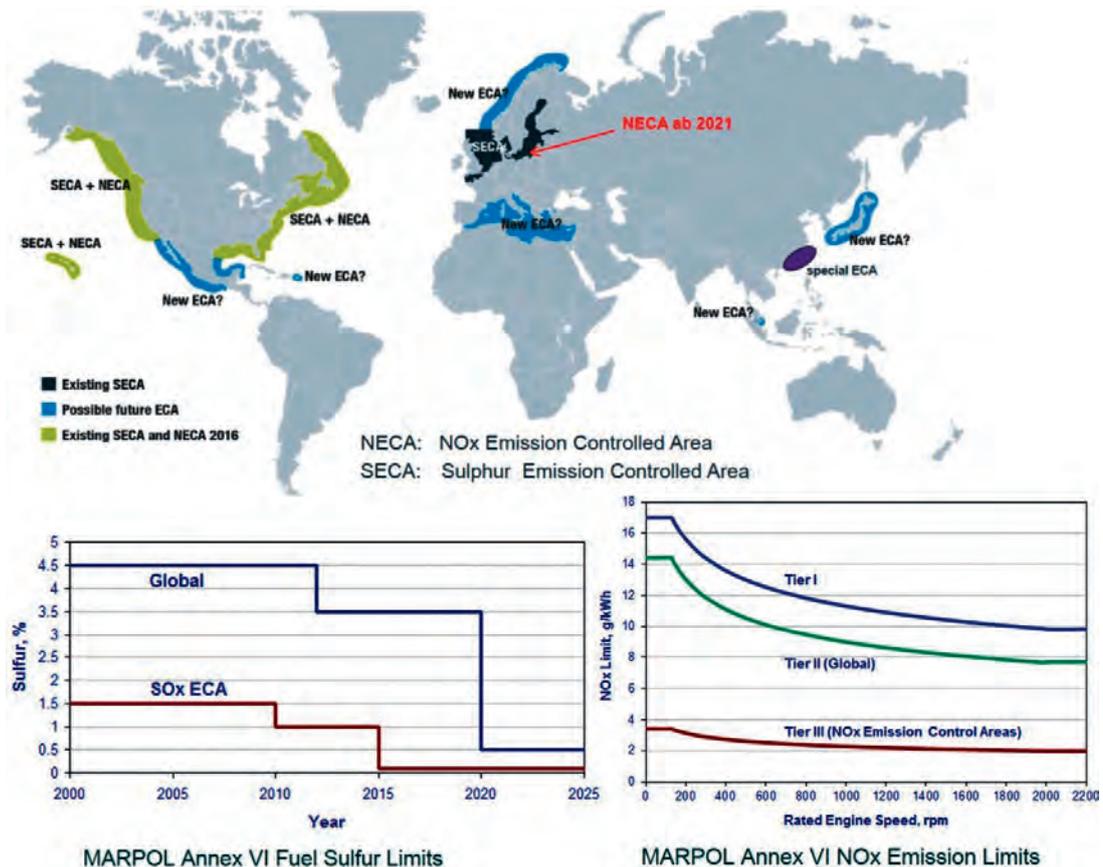
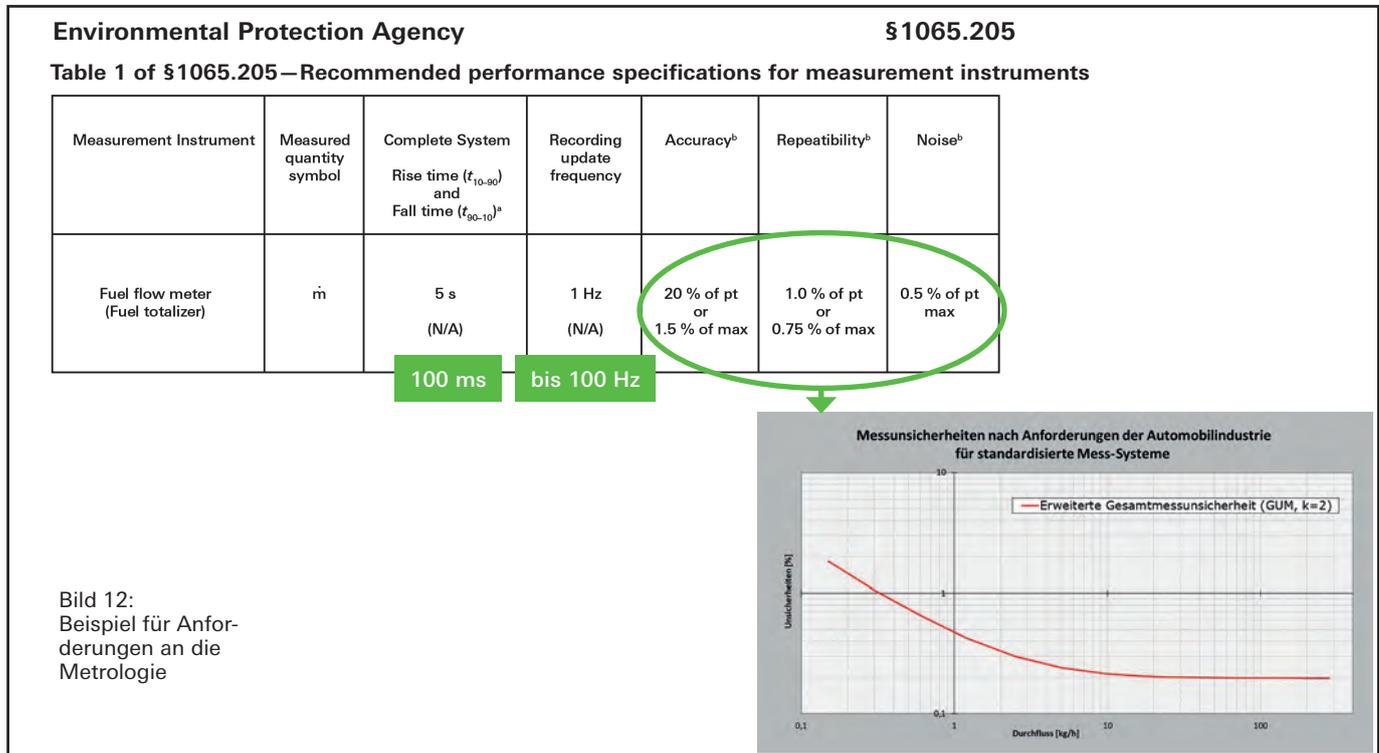
Fehlmessungen in jeder Schubphase. Ungeklärt ist der Fehler im akkumulierten Verbrauch bei Messgeräten, die ab einem definierten Wert unterhalb des Kalibrierbereiches den Durchfluss „Null“ abgeben.

8. Anforderungen an die Metrologie

Die für die Homologierung verbindlichen Standards erfüllen nicht die Anforderungen an die Kraftstoffverbrauchsmessung im Entwicklungsprozess von Motoren und Fahrzeugen. Die vorgegebenen Angaben beziehen sich ausschließlich auf die zum Einsatz vorgesehenen Messgeräte. Unabhängig von den Regelwerken hat die deut-

sche Automobilindustrie deshalb eigene Anforderungen in entsprechenden Lastenheften definiert. Diese fordern standardisierte Konzepte, die für alle Applikationen gleichermaßen einsetzbar sind und deren Anforderungen an die Genauigkeiten weit über die geforderten Standards hinausgehen. Nur mit klar definierten Funktionalitäten der Mess-

einrichtungen sowie Forderungen an die Gesamtmessunsicherheiten für Verbrauchswerte, die unter realen Betriebsbedingungen im Prüffeld erreicht werden müssen, lassen sich moderne Gemischbildungskonzepte nachhaltig absichern. In Bild 12 sind diese Anforderungen beispielhaft im Vergleich dargestellt.



Timelines of EU MRV and IMO-DCS

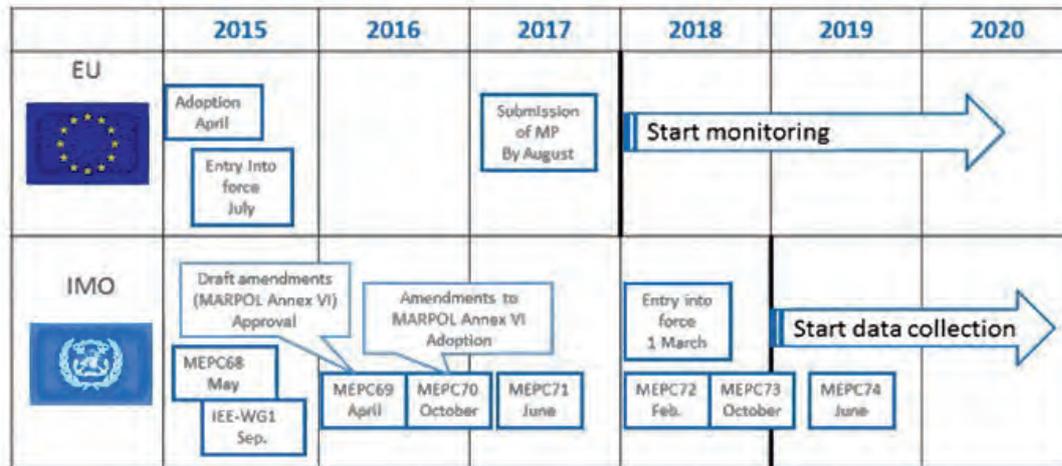


Bild 14a:
Zeitplan für EU MRV
und IMO-DCS [7]

Wie aus Bild 12 ersichtlich, ist für einen Nachweis der Genauigkeit für Messungen am befeuerten Motor die Forderung nach einer isolierten Kalibrierung des Messgerätes nicht sinnvoll. Sie ist zwar, ebenso wie die Kalibrierung eines Dichtensensors (bei den Forderungen zur Darstellung von volumetrischen und gravimetrischen Messergebnissen) im Rahmen der Gesamtmessunsicherheitsbetrachtung zwingend erforderlich, aber für den Nachweis der Genauigkeit für stationäre und dynamische Messungen am befeuerten Motor nicht ausreichend. Für die Kalibrierinfrastruktur ergeben sich folgende Forderungen:

- Der Nachweis der Gesamtmessunsicherheit ist, neben der Kalibrierung der eingesetzten Messgeräte, auf eine Kalibrierung des standardisierten Messsystems auszudehnen. Als Schnittstelle für ein Normal ist hier die Schnittstelle für die Adaption des Systems an den Motor vorzusehen.
- Eine Kalibrierung muss hinsichtlich der erreichbaren Messunsicherheiten an die in den Lastenheften der deutschen Automobilindustrie definierten Genauigkeiten (Bild 9) angepasst sein.
- Für Zyklusmessungen (wie beispielhaft in den Bildern 10 und 11 dargestellt) ist ein dynamisches Kalibrierprozedere zu entwickeln, welches die Feststellung eines Messfehlers für akkumulierte Verbrauchsbestimmungen beinhaltet. Die Messzeiten hierfür sind bis hinunter auf 100 Hz vorzusehen, um qualitativ einen Vergleich der Sollwertvorgabe aus dem Motorsteuergerät mit dem Ist-Wert des tatsächlich gemessenen Verbrauchs zu erhalten.

9. Regelwerk für Verbrauchsmessungen im maritimen Bereich in Sonderzonen

Antreiber zur Reduzierung der Schadstoffemissionen von Schiffen sind die UN sowie die IMO (*Internationale Maritime Organisation*).

Bereits ab dem Jahr 2000 sind von der IMO sukzessiv die in Bild 13 dargestellten Sonderzonen eingeführt worden, in denen spezielle Umweltrichtlinien zu Emissionen (aber auch zur Abfall- und Brauchwasserentsorgung) gelten.

Als ECAs (*Emission Control Areas*) werden Sonderzonen bezeichnet, in denen diese speziellen Umweltrichtlinien verbindlich sind. Hier gelten gesonderte Beschränkungen für Schwefeloxid-(SO_x), Stickoxid-(NO_x) und Rußpartikel-Emissionen. ECAs mit Schwefelgrenzwerten werden als SECA (*Sulphur Emission Control Area*) und ECAs mit Grenzwerten für Stickoxide als NECA (*Nitrous Oxide Emission Control Area*) bezeichnet.

Seit 2016 sind die zulässigen Schwefelemissionen auf 0,1 % limitiert und zulässige Stickoxidemissionen auf das Niveau von Tier III (2 g/kW·h) abgesenkt worden. Diese Werte sind nur mit Verwendung von Marine-Diesel-Öl (MDO) bzw. mit dem in der Automobilindustrie spezifiziertem Diesel zu erreichen. Außerhalb der Schutzzonen wird allerdings mit deutlich kostengünstigerem HFO (*Heavy Fuel Oil*) ohne Rücksicht auf die Umwelt gefahren. Die Einhaltung der Grenzwerte ist dadurch nachzuweisen, dass die eingesetzten Motoren nach der Gesetzgebung der US EPA- sowie der UN-Richtlinien mit Marine-Diesel-Öl homologiert sind und dass rechtzeitig vor Einfuhr in die Sonderzonen ein Wechsel des Kraftstoffes von HFO auf MDO erfolgt ist.

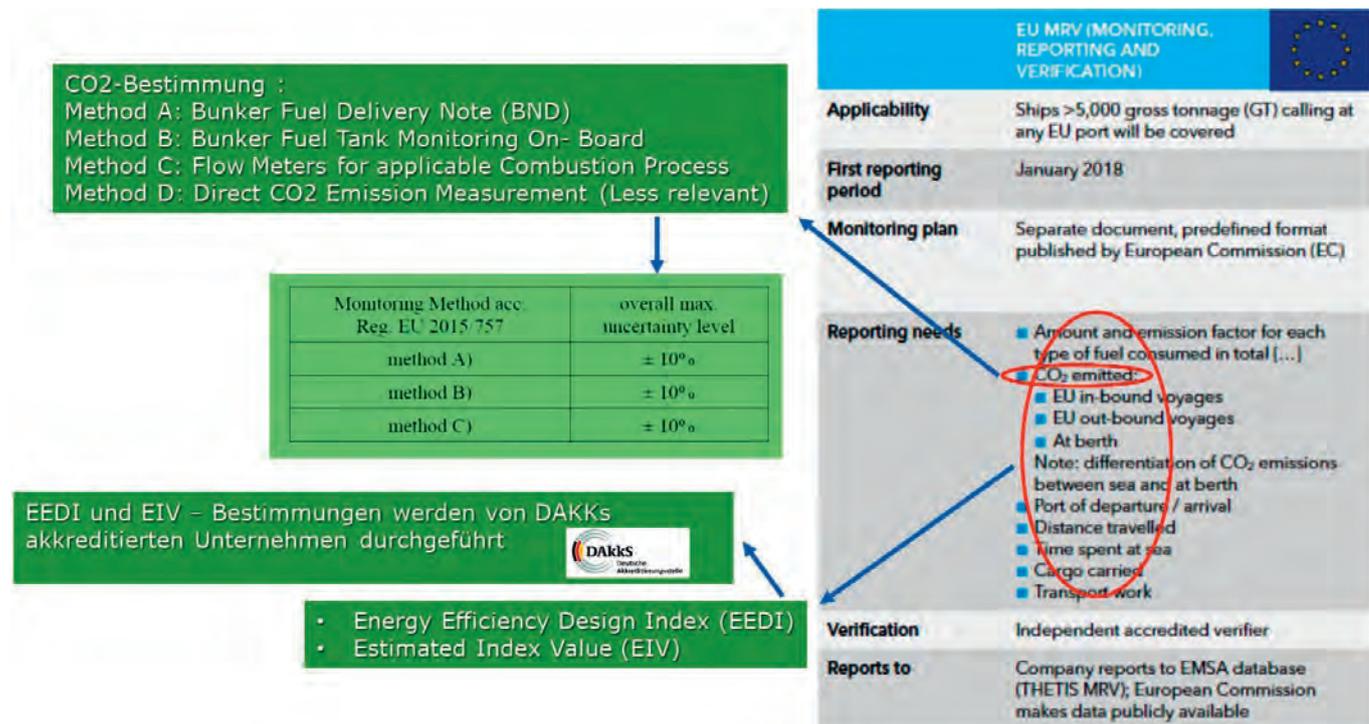


Bild 14b: Möglichkeiten der CO₂-Bestimmung gemäß EU-MRV

10. Regelwerk zur Limitierung von CO₂

Um dem Ausstoß von GHG (*Green House Gases*) entgegenzuwirken, wurden von der EU nach der Verordnung 757/2015 –MRV (Monitoring, Reporting & Verification – MEPC.278(70) / MARPOL Annex VI – Regulation 22A) ein Datenerfassungssystem für CO₂ und von der IMO das IMO DCS (*Data Collection System*) für den Kraftstoffverbrauch von Schiffen ≥ 5000 GT eingeführt. Der EU MRV-Reporting Process lief bereits im Jahr 2018. Erste Ergebnisse werden ab Juni 2019 publiziert.

Beide Prozesse laufen, wie aus Bild 14a ersichtlich, parallel. Wie aus Bild 14b ersichtlich, kann gemäß des EU-MRV die CO₂-Bestimmung mit verschiedenen Methoden erfolgen. Die maximale Unsicherheit darf hierbei 10 % betragen. Zusammen mit anderen Betriebsdaten werden durch DAKKS akkreditierte Zertifizierungsstellen Kennzahlen zur Beurteilung einer rationellen Energieverwendung ermittelt.

Es ist anzunehmen, dass sich viele Schiffseigner für die „Methode C“ zur CO₂-Bestimmung entschieden haben, da die Kenntnis des Kraftstoffverbrauchs es ermöglichen könnte, die Schiffseffizienz zu optimieren und damit Potenzial beinhaltet, Betriebskosten zu minimieren.

11. Verbrauchsmessungen im maritimen Bereich zur Steigerung der Schiffseffizienz

Die Einhaltung der Vorgaben bzw. der Nachweis der beschriebenen Maßnahmen bedeuten für die

Reeder bzw. Schiffsbetreiber (Charterfirmen) einen nicht unerheblichen finanziellen Aufwand, aus dem sie keinen Nutzen ziehen können. Die Kenntnis eines gemessenen Brennstoffverbrauchs im operativen Schiffsbetrieb ist zwar von Interesse, kann aber auch, wie aus Abbildung 14 ersichtlich, durch die gebunkerten (nachgetankten) Kraftstoffmengen nachgewiesen werden. Da nach den Angaben von Reedern ca. 70 % der Betriebskosten eines Schiffes auf den Brennstoffverbrauch entfallen, gewinnt die Kenntnis darüber erst an Bedeutung, wenn man damit Einsparungen erzielen kann. Mit der Adaption von Messgeräten zur Bestimmung des Verbrauchs im operativen Schiffsbetrieb an Bord, ist damit zunächst der erste Schritt getan. Eine Verbesserung der Schiffseffizienz ist aber nur durch gleichzeitige Nutzung von Experten- und Assistenz-Systemen in Verbindung mit der momentanen Verbrauchsbestimmung erreichbar. In Bild 15 werden die Möglichkeiten aufgezeigt.

Eine Steigerung der Schiffseffizienz kann man mittels Schiffs-spezifischer Maßnahmen, etwa durch Optimierung der Propulsion oder Routenoptimierung, erreichen oder mittels Motor-spezifischer Maßnahmen, etwa durch Motor-Online-Diagnostik (*Engine Monitoring*) sowie durch zylinderselektive Verbrennungsoptimierung und frühzeitige Schadenserkenkung.

Hierfür sind am Markt diverse Systeme unterschiedlicher Hersteller aus vielen Ländern verfügbar, die Einsparpotenziale im spezifischen Brennstoffverbrauch in erheblichem Ausmaß versprechen. Als realistische Potenziale sollten hier Werte zwischen 1 g/kW·h und vielleicht 4 g/kW·h angenommen werden. Je nach Leistung des Motors

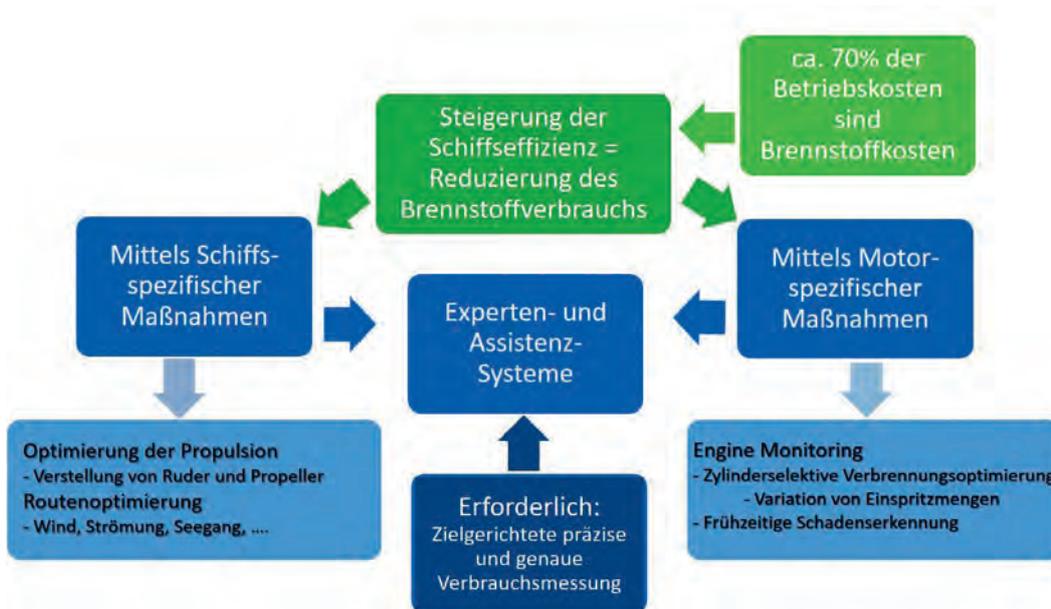


Bild 15: Steigerung der Schiffseffizienz

resultieren hieraus schon erhebliche Reduzierungen der Brennstoffkosten. Dies soll an einem Beispiel einer Variation von Einspritzmengen verdeutlicht werden, um den Zylindergleichlauf, der durch Verkokung der Einspritzventile an einem Großdiesel entstanden ist, sicherzustellen. Bild 16 verdeutlicht den Vorgang.

Man erkennt im Bild 16 links oben die Zylinderköpfe des Motors mit den Einspritzventilen (grau). Im Diagramm sind die Einstellwerte über den Einstellpunkten dargestellt. Durch händische Verstellung (Bild links unten) kann man bei laufendem Motor die in den Diagrammen dargestell-

ten Verläufe abgleichen. Damit verbessert man die Motorleistung und minimiert den Verschleiß. Das im Bild dargestellte AVL-EPOS™-Expertensystem bietet darüber hinaus weitere Möglichkeiten, Motorfunktionen zu überwachen. Allein durch die Zylinderangleichung kann der Verbrauch nach Expertenaussagen, empirisch ermittelt, um bis zu 3 g/kW·h reduziert werden. Damit lassen sich Brennstoffkosten von bis zu 53.000,- USD (je nach Marktpreis und Ort des Bunkerns) pro Monat einsparen. Ähnliche Einsparungen können zusätzlich durch Nutzung Schiffsspezifischer Maßnahmen erreicht werden.

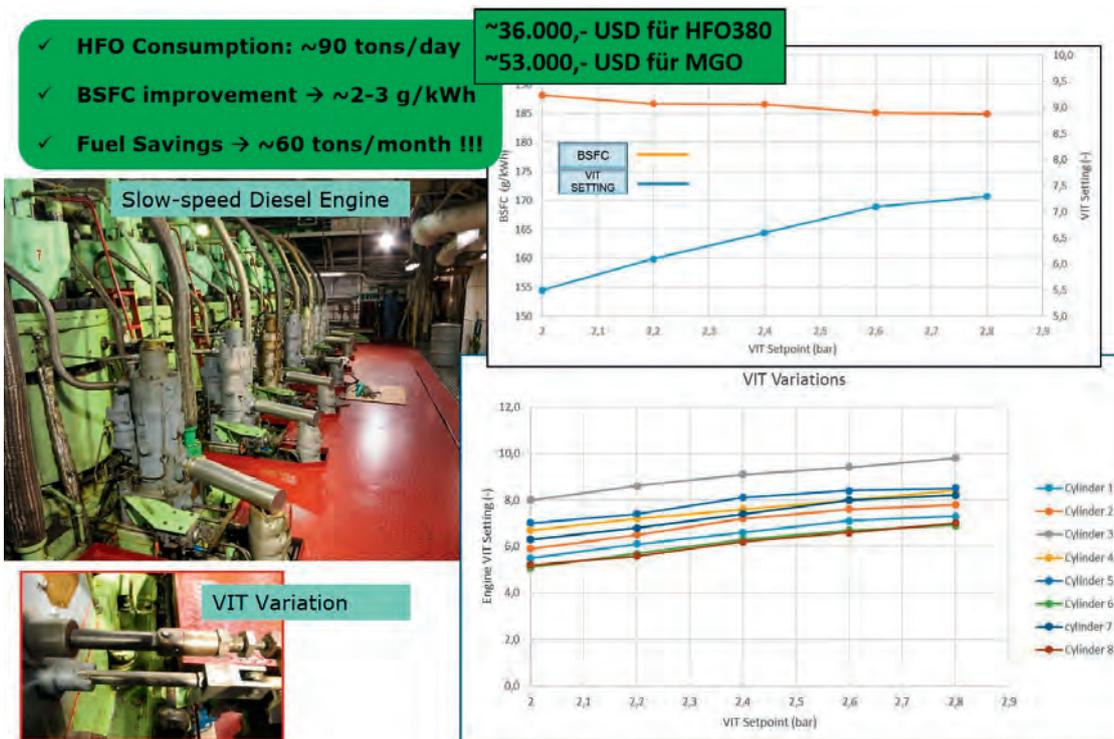


Bild 16: Optimierung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs (BSFC: Brake Specific Fuel Consumption) [4]

12. Applizierte Messfahren im Schiffsbetrieb

Dieselmotoren im maritimen Einsatz unterscheiden sich hinsichtlich der äußeren Gemischbildung grundsätzlich nicht von den Dieselmotoren im automobilen Bereich. Die Kraftstoffzumessung erfolgt über elektrisch hydraulisch aktivierte Einspritzventile, die von einer Motorsteuerung bedient werden. Der technische Aufwand der Gemischaufbereitung ist, bedingt durch den Einsatz von HFO, allerdings deutlich aufwendiger. So muss z. B. HFO 700 (700 cSt bei 50 °C) auf ca. 150 °C aufgeheizt werden, um die für eine Einspritzung durch den Injektor erforderliche Viskosität von ca. 6 cSt zu erreichen. Im Booster-System des Motors sind deshalb großvolumige Misch tanks und Wärmetauscher integriert, um die Versorgung des Motors mit entsprechend aufbereiteten Kraftstoff zu gewährleisten.

Die üblichen Adaptionen von Messgeräten sind in Bild 17 dargestellt.

Man unterscheidet grundsätzlich nach der Ein- oder Zwei-Geräte-Praxis. Die Ein-Geräte-Praxis (Bild 17a) entspricht der im automobilen Bereich applizierten Adaptionmethode. Hierbei gelangt der Rücklauf vom Motor wieder stromaufwärts vor das Messgerät. Die Umlaufmenge über den Motor, die von den Booster-Pumpen bereitzustellen ist, muss nach Anforderung der Klasse dem 3-fachen maximalen Verbrauch des Motors entsprechen.

Bild 17a:
Übliche Adaptionen von Messgeräten (Ein-Geräte-Praxis) [5]

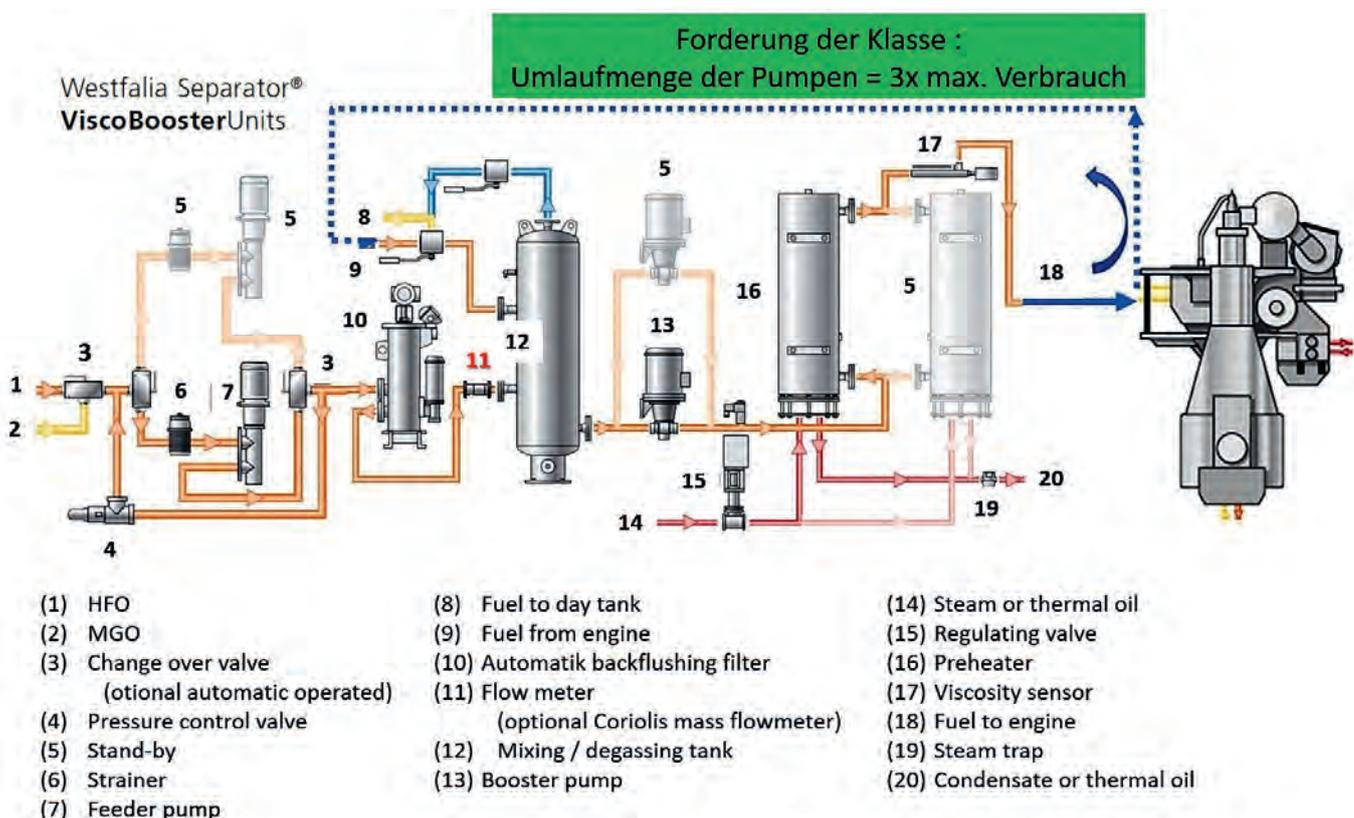
Die Zwei-Geräte-Praxis (Bild 17b) sieht je ein Messgerät im Zulauf zum Motor und ein weiteres im Rücklauf vom Motor in den Misch tank. Durch Differenzbildung ermittelt man den Verbrauch.

Zum Stand der Technik ist folgendes zu erwähnen:

- Die Installation der Durchflussmessgeräte erfolgt in Markt-verfügbare Booster-Units
 - ▷ gerade, wo es räumlich passt
 - in Vorlauf und Rücklauf vom Motor
 - nur im Vorlauf mit Rücklauf in den Misch tank.
- Es gibt keine definierten Betreiberforderungen
 - ▷ an einzuhaltende Normen
 - ▷ Funktionalitäten.
- Es gibt keine Bewertung der Einflussgrößen zur Bestimmung von Messunsicherheiten.
- Es gibt keine standardisierten Systeme
 - ▷ und damit je nach Messaufbau unterschiedliche Verbrauchswerte und Messunsicherheiten.

13. Bewertung der Messfahren im Schiffsbetrieb

Die UN-MRV- bzw. IMO-DCS-Richtlinien erfordern grundsätzlich nur eine akkumulierte Bestim-



Micro Motion Messung der Kraftstoffeffizienz

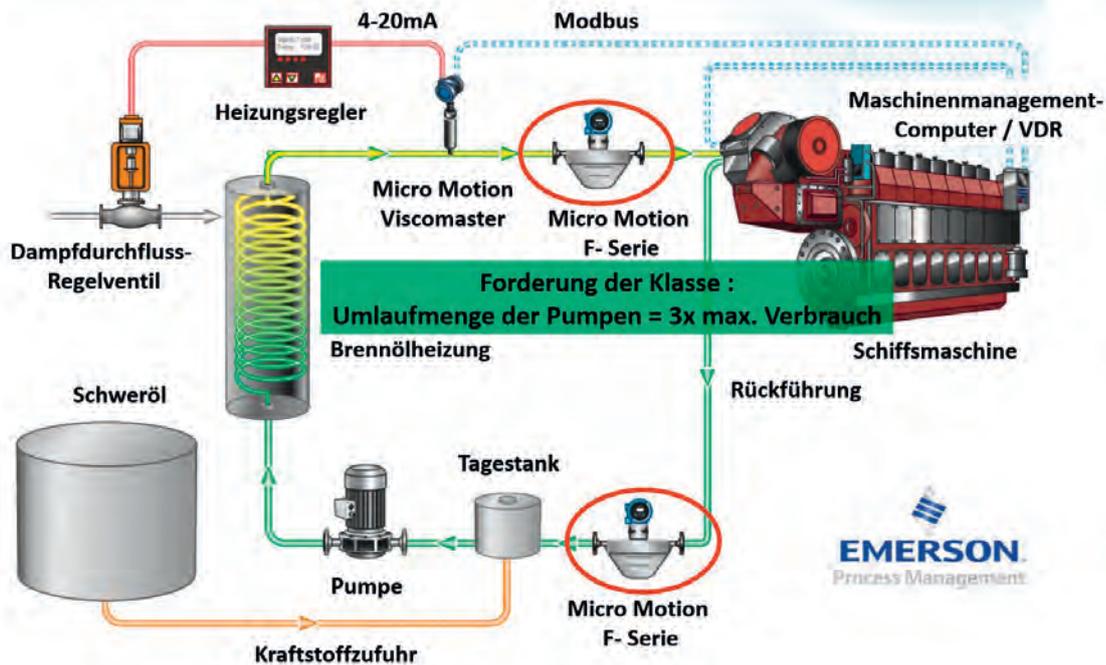


Bild 17b: Übliche Adaptionen von Messgeräten (Zwei-Geräte-Praxis) [6]

mung der verbrauchten Brennstoffmenge z. B. in Kilogramm über eine zurückgelegte Distanz. Bei Beginn der Reise beginnt die Messung mit dem Motorstart und endet bei dessen Abschalten.

Bei einer Verwendung von Experten- und Assistenzsystemen zur Optimierung der Schiffseffizienz lässt sich die Wirksamkeit einer eingeleiteten Maßnahme in der Regel unmittelbar durch die Anzeige einer reduzierten Menge im Kraftstoffverbrauch z. B. in kg/h bestätigen.

Wie aus Bild 18 ersichtlich, erfordern beide Verfahren unterschiedliche Betrachtungsweisen und Aufwände bei der Verbrauchsermittlung.

Fall I:

Die Messstrecken sind am Ende der Messungen im gleichen physikalischen Zustand wie zu Beginn der Messungen.

Die Gesamtmessunsicherheiten der Messwerte werden in der Hauptsache durch die Leistungsfähigkeit der Messgeräte bestimmt. (Bild 19)

Die zu erwartenden Gesamtmessunsicherheiten liegen unter 10 %, womit die Forderungen zur MRV- Regulation erfüllt sind.

Fall II:

Die Messstrecken unterliegen ständigen Änderungen durch zusätzliche Einflussgrößen. Die Ermittlung der Gesamtmessunsicherheiten muss unter Berücksichtigung dieser Einflussgrößen erfolgen. (Bild 20)

Die Einflussgrößen sind zu denen im automobilen Bereich an Motor- und Fahrzeugprüfständen identisch. Die Ermittlung der Gesamtmessunsicherheiten erfolgt analog zu den Ausführungen in Abschnitt 6.

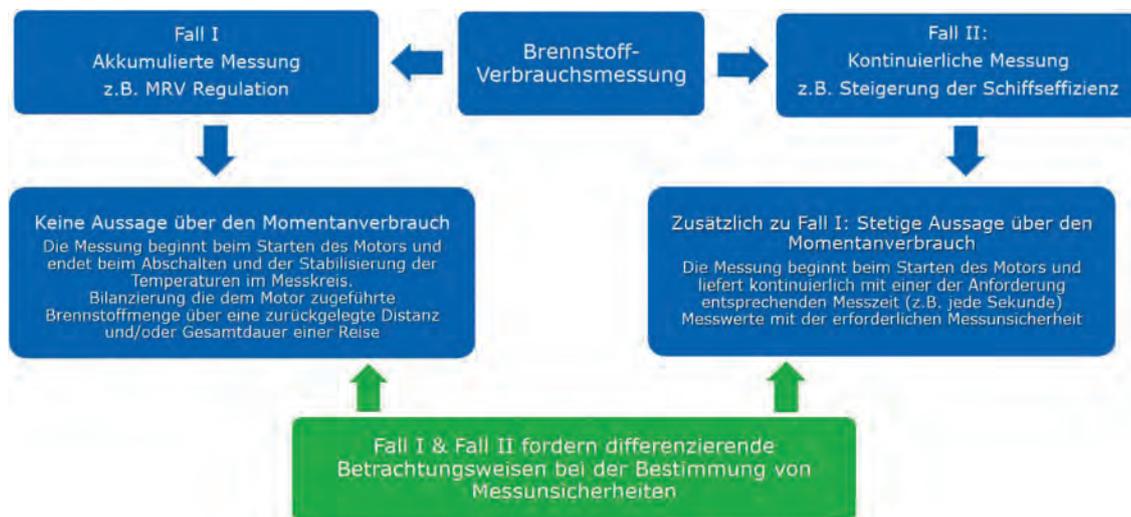


Bild 18: Betrachtungsweisen bei der Verbrauchsermittlung.

14. Erreichbare Gesamtmessunsicherheiten für kontinuierliche Messungen

In Kapitel 11 sind Einsparpotenziale durch die Nutzung von Experten- und Assistenzsystemen beschrieben worden. Wie ausgeführt, können bereits mit kleineren Verbrauchsreduzierungen

von z. B. 3 g/kW·h Einsparungen in den Kosten für Brennstoff jährlich im 6-stelligen Bereich erreicht werden. Um diese Verbrauchsreduzierung plausibel nachweisen zu können, sollte die Gesamtmessunsicherheit für den angezeigten Verbrauchswert mindestens 5-fach kleiner sein. Die erforderlichen Gesamtmessunsicherheiten sind,

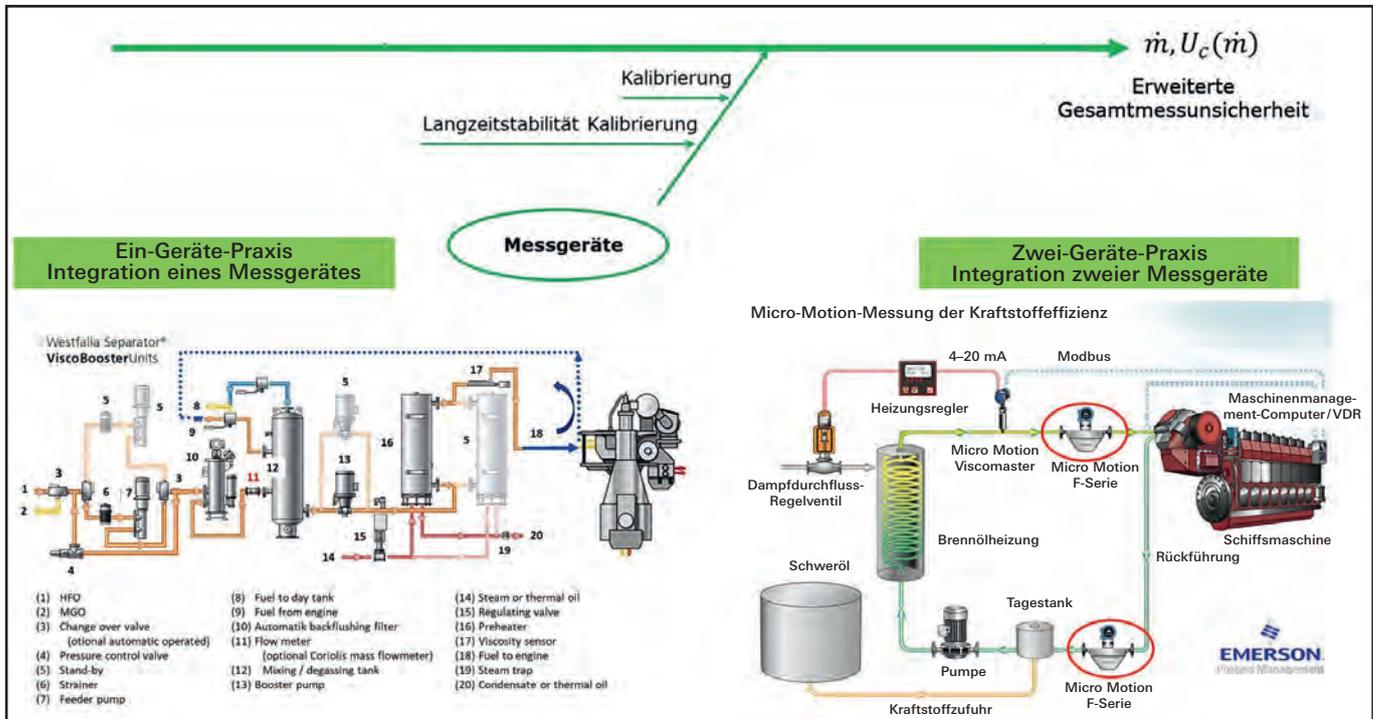
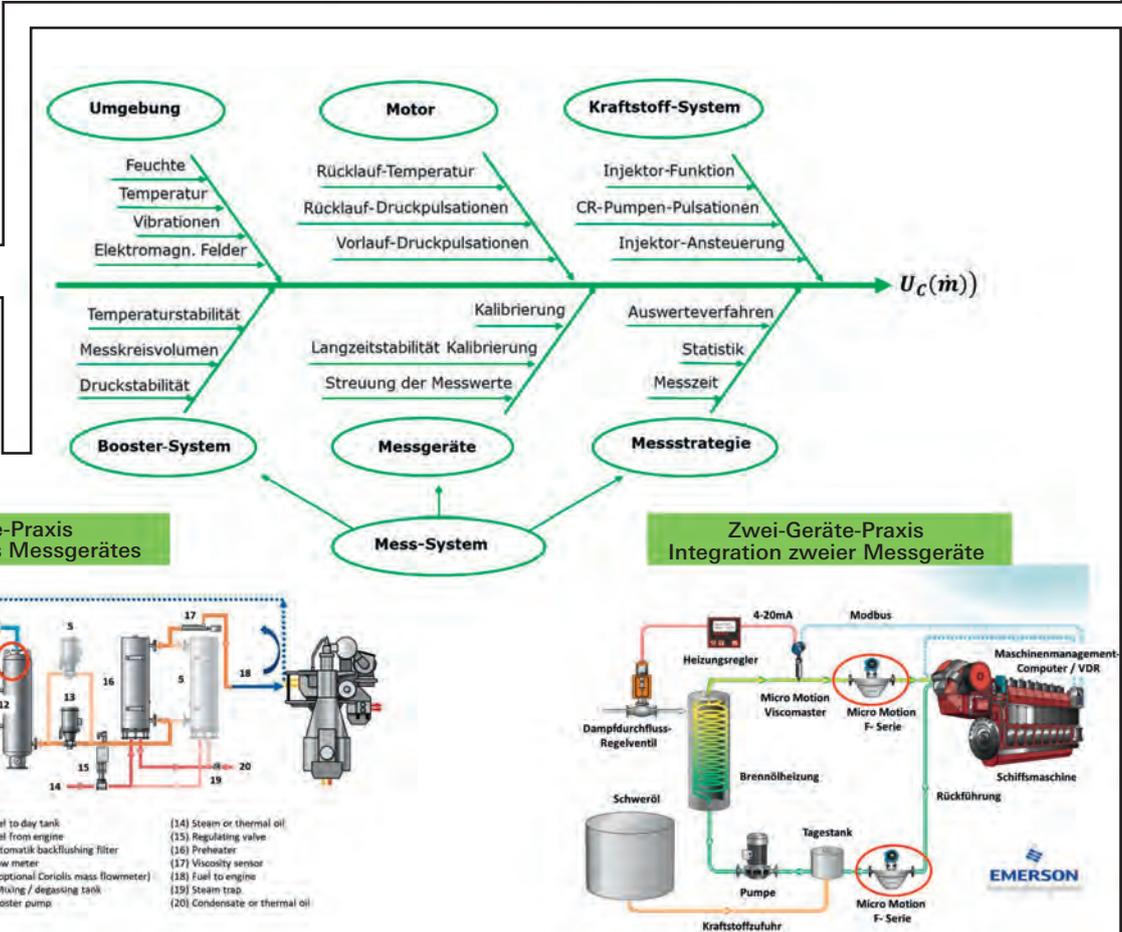


Bild 19: Betrachtungsweisen bei der Verbrauchsermittlung für akkumulierte Messungen des Kraftstoffverbrauchs [5, 6]

Bild 20: Betrachtungsweisen bei der Verbrauchsermittlung für kontinuierliche Messungen



wie in Bild 21 dargestellt, je nach Ausgangslage (spezifischer Verbrauch) unterschiedlich.

Bei einem spezifischen Verbrauch von z. B. 180 g/kW·h und einer Reduzierung von 3 g/kW·h

sollte die erforderliche Gesamtmessunsicherheit ca. 0,33 % betragen, um eine Verbesserung der Schiffseffizienz sicherzustellen.

Wie bereits in Abschnitt 12 ausgeführt, existiert

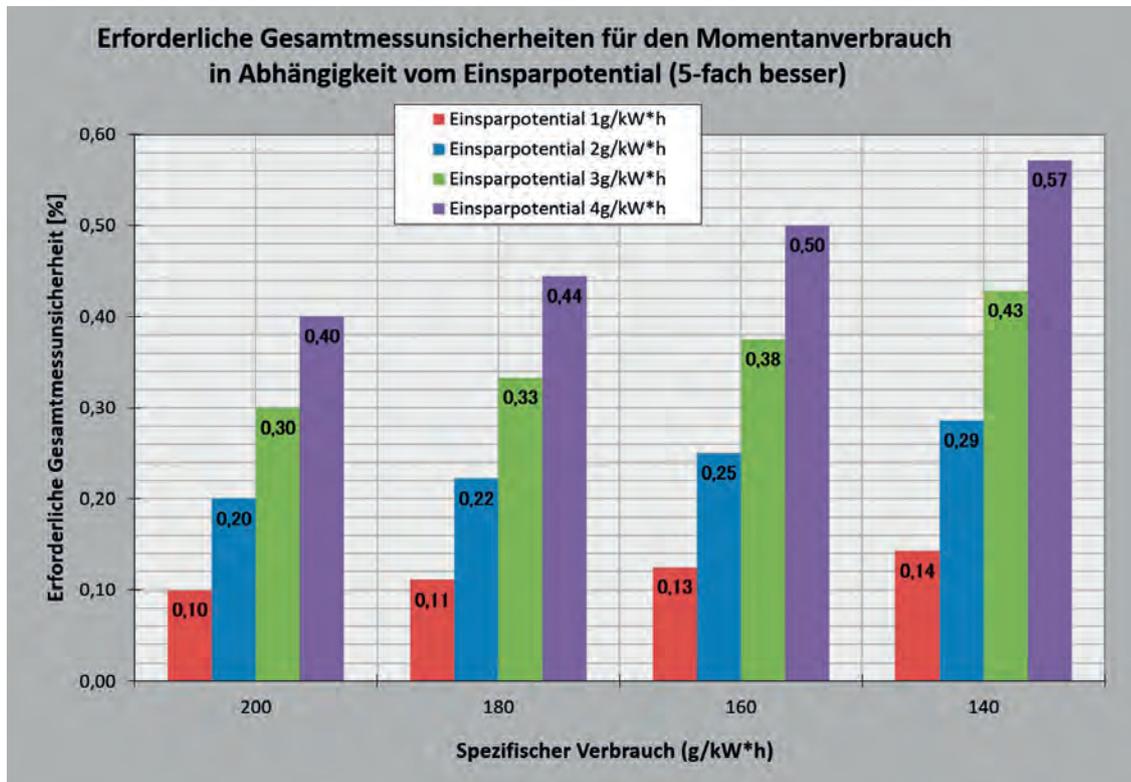
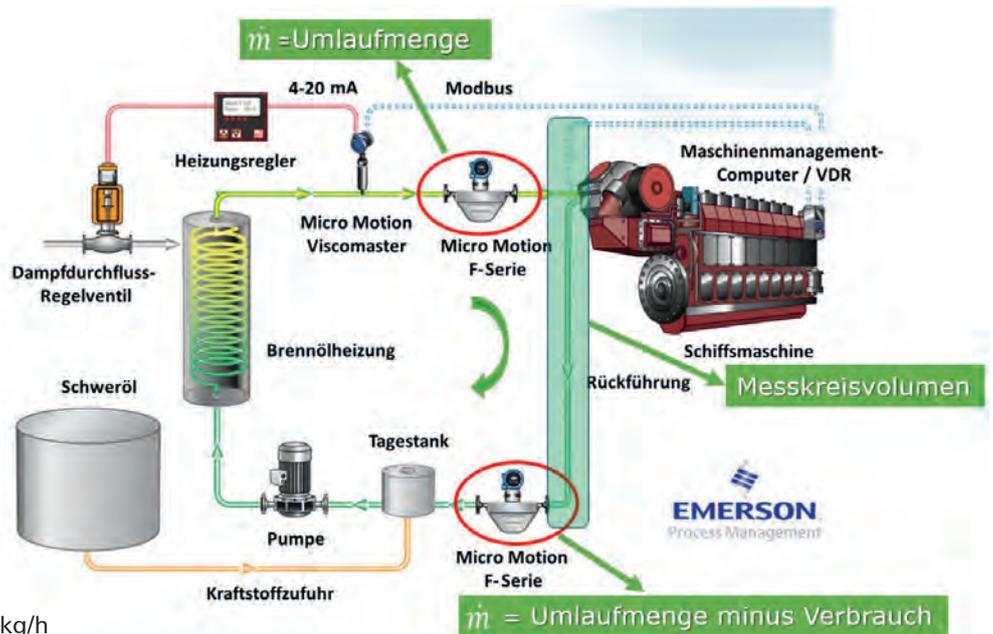


Bild 21: Erforderliche Gesamtmessunsicherheiten zur Realisierung von Einsparpotenzialen



Beispiel:

- Messbereich 0,5...3500 kg/h
- Umlaufmenge 10500 kg/h (3 x Qmax, Forderung der Klasse)
- Mess-Zeit (Update-Zeit) 1 s

Einflussgrößen:

- Gesamtmessunsicherheiten der Kalibrierung der Messgeräte (z. B. Coriolis): 0,1 % v. M.
- Langzeitstabilitäten: 0,15 % v. M.
- Messkreisvolumen pro Strang: 25 dm³
- Temperatur-Regelgüte in jedem Strang: 2 °C
- Streuungen (Standardabweichungen)
 - Vorlauf: 0,9 % (bei 10500 dm³), 1 s Messzeit mit gleitender Mittelwertbildung
 - Rücklauf 0,9 % bis 3,1 %, 1 s Messzeit mit gleitender Mittelwertbildung

Bild 22: Messaufbau Zwei-Geräte-Praxis

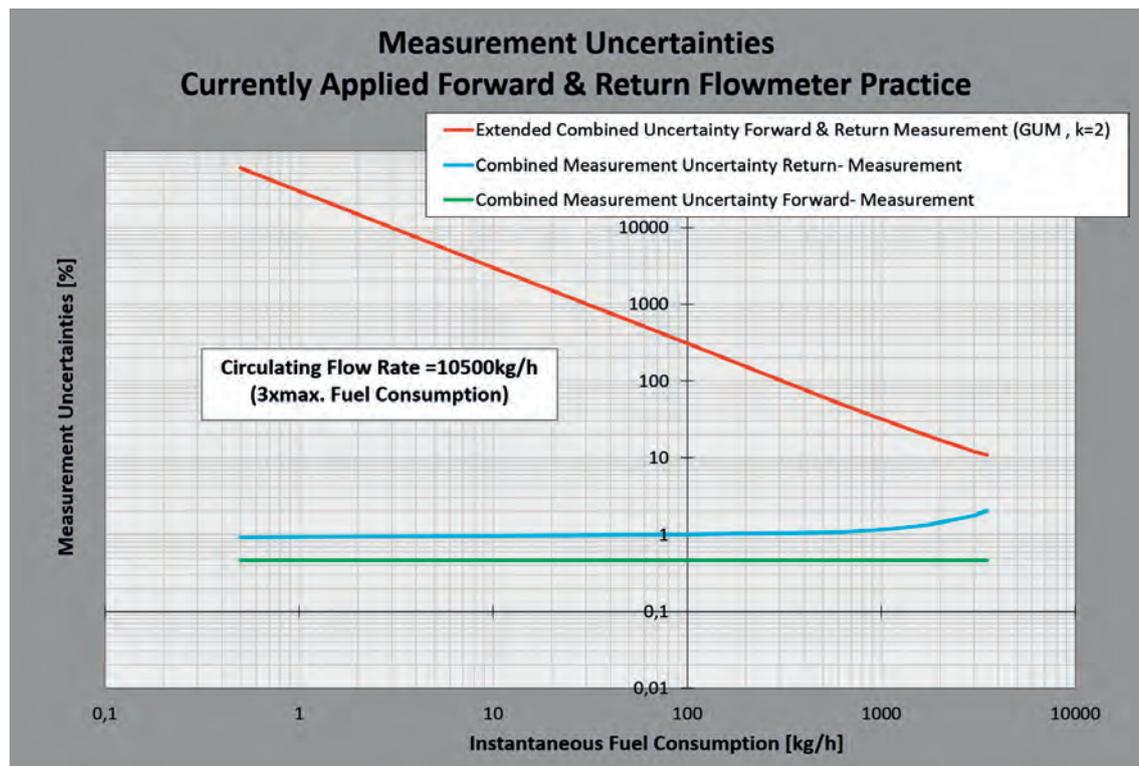


Bild 23:
Typische Gesamtmessunsicherheit für die Zwei-Geräte-Praxis

tieren für Verbrauchsmessungen an Bord keinerlei Richtlinien und Standards. Die Integration von Durchflussmessgeräten erfolgt mehr oder weniger konzeptlos. Es wird angenommen, dass die Genauigkeit der Messungen immer identisch ist mit den Genauigkeiten, die die Messgerätehersteller für ihre Geräte gemäß Kalibrierschein angeben, was für akkumulierte Messungen im Rahmen der UN-MRV-Regeln in etwa auch zutrifft, aber auch nur dort. Basierend auf real auf Schiffen ausgeführten Installationen sind im Folgenden Abschätzungen für die zu erwartenden Gesamtmessunsicherheiten für kontinuierliche Messungen analog zu den Abschätzungen gemacht worden, wie sie für Messaufgaben im automobilen Bereich Standard sind. In Bild 22 ist ein typischer Aufbau dargestellt, mit dem durch Differenzbildung von Vorlauf zu Rücklauf der Verbrauchswert bestimmt wird. Für einen Motor mit ca. 20 MW Leistung beträgt der maximale Verbrauch ca. 3500 kg/h. Die Umlaufmenge beträgt laut Forderung der Klasse damit 10500 kg/h, d. h. bei maximalem Verbrauch beträgt der Rücklauf immer noch 7000 kg/h. Da die Messgeräte nahe am Motor verbaut werden können, ist das Messkreisvolumen relativ klein und ist mit jeweils 25 l angesetzt. Die Temperatur im Messkreis wird laut Expertenaussage auf ± 2 °C geregelt.

Die abgeschätzten Gesamtmessunsicherheiten sind in Bild 23 dargestellt.

Bedingt durch die kleinen Messkreisvolumina ist der Temperatureinfluss relativ gering. Für das Messgerät, welches im Rücklauf adaptiert ist, vergrößert sich bei steigendem Durchfluss (geringerer Durchfluss durch das Gerät) der Anteil der Streuungen.

Die extrem hohe erweiterte Gesamtmessunsicherheit über dem Verbrauch ergibt sich daraus, dass die hohen Umlaufmengen auf den Durchflusswert zu beziehen sind. Typische Verbrauchswerte liegen bei einem Motor zwischen 100 kg/h bis 3500 kg/h. Selbst bei einem maximalen Verbrauch von 3500 kg/h läge die erweiterte Gesamtmessunsicherheit immer noch bei ca. 10 %.

Ein Einsparpotenzial von 3 g/kW·h kann mit solch einem Messaufbau nicht bestätigt werden.

Bild 24 zeigt einen vergleichbaren Aufbau nach der Ein-Geräte-Praxis.

Da der Rücklauf vom Motor wieder zurück in den Mischtank (stromaufwärts vor das Messgerät) geleitet wird, ergeben sich einbaubedingt relativ große Messkreisvolumina, abhängig von der Motorgröße, im folgenden Aufbau typisch ca. 800 l.

Die abgeschätzten Gesamtmessunsicherheiten sind in Bild 25 dargestellt.

Wie aus Bild 25 ersichtlich, dominiert (wie auch aus der Erfahrung aus dem Automobilbereich bekannt) der Einfluss der Temperatur im Zusammenwirken mit dem großen Messkreisvolumen. Im Vergleich zur Zwei-Geräte-Praxis sind aber kleinere Gesamtmessunsicherheiten zu erwarten.

Ein Einsparpotenzial von 3 g/kW·h kann auch mit diesem Messaufbau nicht bestätigt werden.

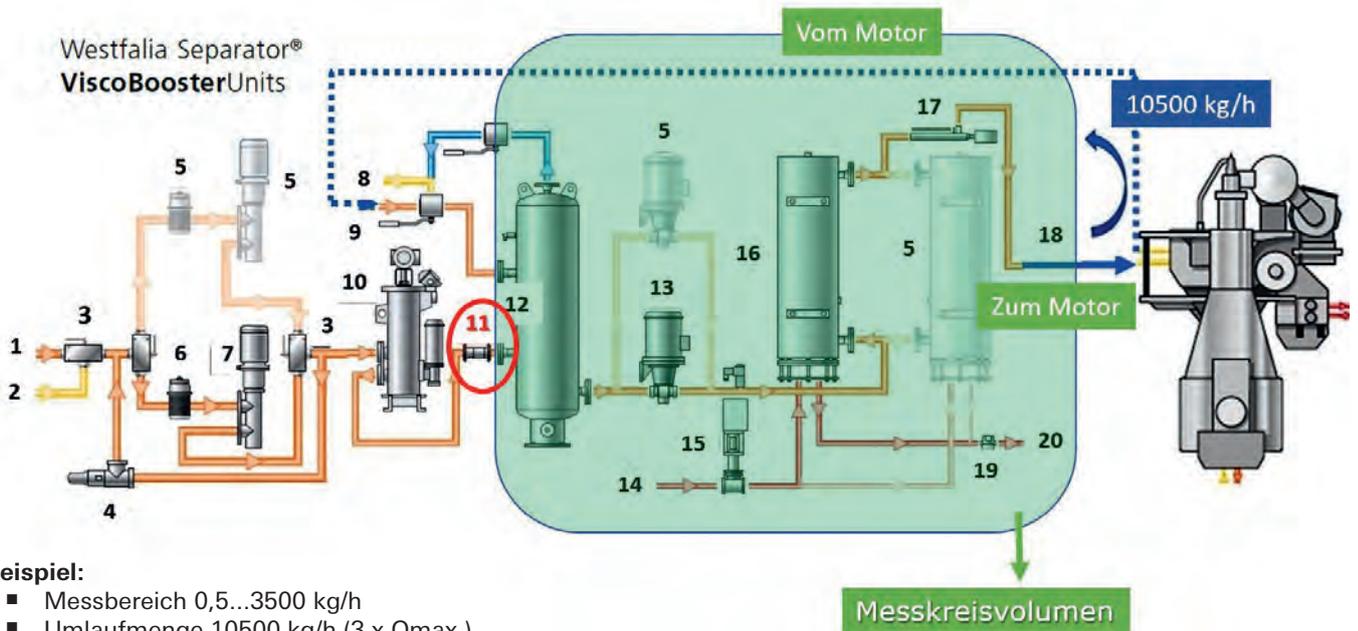
15. Optimiertes Brennstoff-Verbrauchsmesssystem

Cross-Innovation als Lösungsstrategie

Wie im Abschnitt 5 ausgeführt, sind standardisierte Messsysteme für den Einsatz im Motor-

und Fahrzeug-Prüffeld für die Bestimmung von Brennstoffverbräuchen in der Automobilindustrie seit Jahren bekannt und Branchenstandard – nicht so jedoch in der Schifffahrt. Wie nachfolgend gezeigt wird, kann durch die Inkorporation von bewährten Messtechniken der Automobilindustrie in die Schifffahrt in Verbindung mit der Nutzung

innovativer Experten- und Assistenz-Systeme ein effizienterer Schiffsbetrieb realisiert und die Einhaltung von Schadstoffemissionen nachgewiesen werden. Die aus den Anforderungen der Automobilindustrie resultierende Systemarchitektur ist konsequent auf die Nutzung am Schiffsmotor zu übertragen. Unter dem Oberbegriff „Cross



Beispiel:

- Messbereich 0,5...3500 kg/h
- Umlaufmenge 10500 kg/h (3 x Qmax.)
- Mess-Zeit (Update-Zeit) 1 s

Einflussgrößen:

- Gesamtmessunsicherheit der Kalibrierung des Messgerätes (z. B. Coriolis): 0,1 % v. M.
- Langzeitstabilität der Kalibrierung: 0,15 % v. M
- Messkreisvolumen im Messkreis hinter dem Messgerät: ca. 800 dm³
- Temperatur-Regelgüte: 2 °C
- Streuungen (Standardabweichungen): 0,1 %...30 % (Messbereich 0,5...3500 kg/h)

Bild 24: Aufbau nach der Ein-Geräte-Praxis

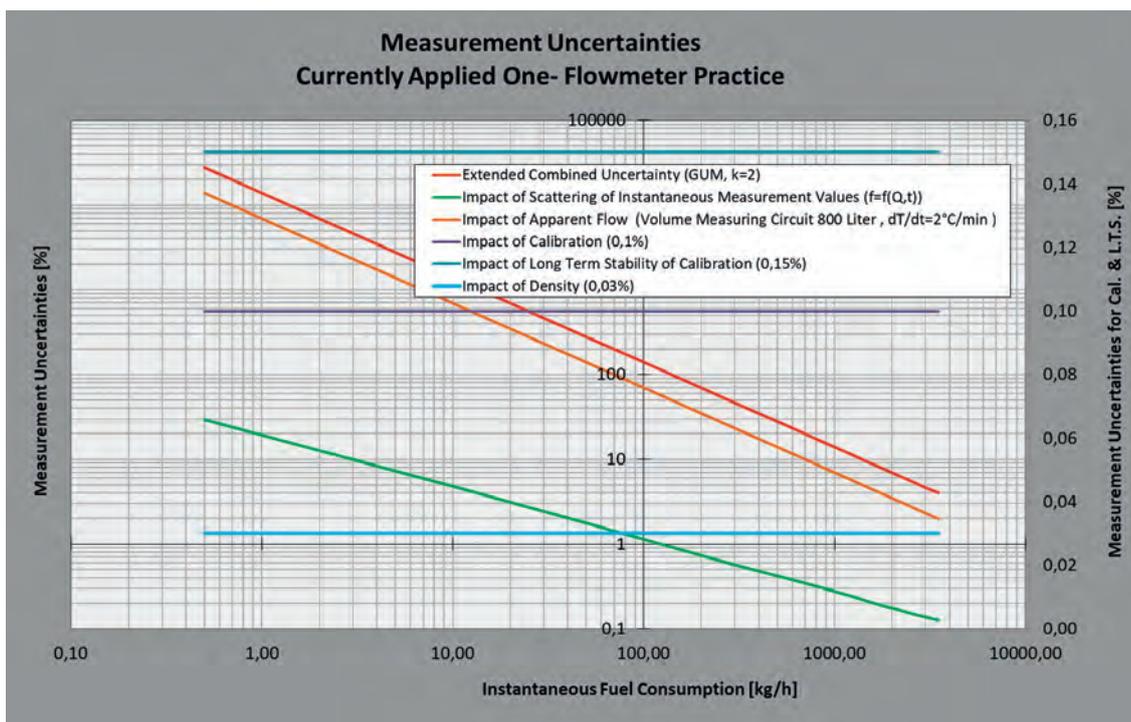


Bild 25: Typische Gesamt-messunsicherheit für „Ein-Geräte-Praxis“.

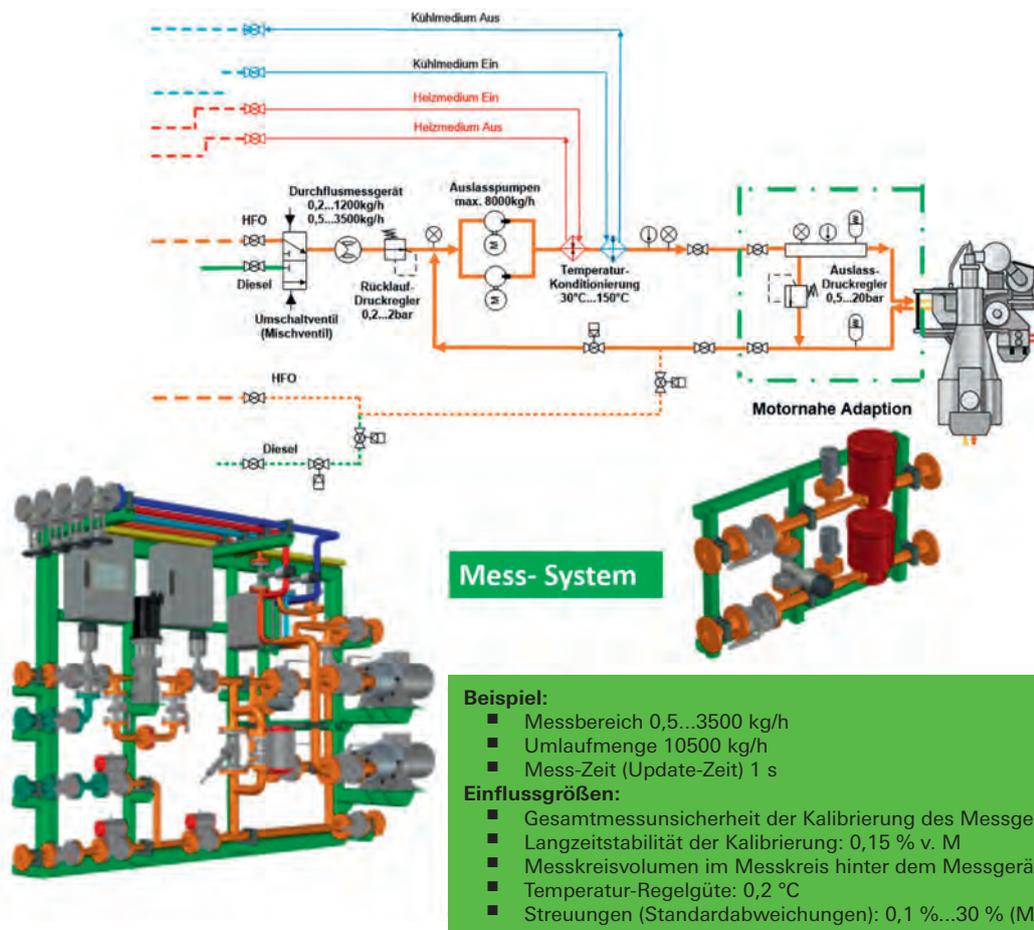


Bild 26: Optimiertes Brennstoff-Verbrauchsmesssystem für den Einsatz auf Schiffen

Innovation als Lösungsstrategie“ ist vom Maritimen Cluster Norddeutschland (MCN) ein Projekt „Hochpräzise Brennstoffverbrauchsmessung“ initiiert worden. Das Projekt verfolgt die nachhaltige Verbesserung der Schiffseffizienz durch Nutzung von Experten- und Assistenzsystemen in Verbindung mit einer genauen Brennstoffverbrauchsmessung zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit des MCN-Klientels.

Die Durchführung des Projektes erfolgt in enger Kooperation mit dem Ingenieurbüro IB-HAWE und der AVL List GmbH / Graz.

Das Projekt befindet sich derzeit in der Realisierungsphase. In Koordinierung durch das MCN sind weitere Partnerunternehmen im MCN in relevante Aktivitäten eingebunden.

In Bild 26 ist die Architektur des Systems dargestellt.

Die Abschätzung der zu erwartenden Gesamtmessunsicherheiten ist im Vergleich unter gleichen Randbedingungen zu den in Bild 22 und Bild 24 ausgeführten Systemen in Bild 27 dargestellt.

Im für den Schiffsbetrieb relevanten Messbereich werden ab ca. 300 kg/h Verbrauch die erforderlichen Messunsicherheiten, die für eine Verbesserung der Schiffseffizienz notwendig sind, erreicht.

16. Anforderungen an die Metrologie

Aus den Ausführungen in Abschnitt 13 kann abgeleitet werden, dass die aus der Automobilindustrie bekannten Vorgehensweisen zur Bestimmung von Gesamtmessunsicherheiten im operativen Motorbetrieb auf einem Schiff nicht bekannt sind.

Schiffsmotoren werden hauptsächlich stationär betrieben. Hinsichtlich der Genauigkeitsanforderungen sind diese, in den von der Motorgröße abhängigen Durchflussbereichen, nahezu identisch zu denen im Automobilbereich.

Genauigkeiten zur Optimierung der Schiffseffizienz können mit der derzeit in großem Umfang eingesetzten Messtechnik (willkürliche Adaption von Messgeräten im Kraftstoffsystem zum Motor wie in Abschnitt 13 beschrieben) nicht erreicht werden.

Wie aus Bild 26 ersichtlich, ist für einen Nachweis der Genauigkeit für Messungen am befeuerten Motor die Forderung nach einer isolierten Kalibrierung des Messgerätes nicht sinnvoll. Sie ist zwar, ebenso wie die Kalibrierung eines Dichtensensors (bei den Forderungen zur Darstellung von volumetrischen und gravimetrischen Messergebnissen) im Rahmen der Gesamtmessunsicherheitsbetrachtung zwingend erforderlich, aber für den Nachweis der Genauigkeit für stationäre Messungen am befeuerten Motor nicht ausreichend.

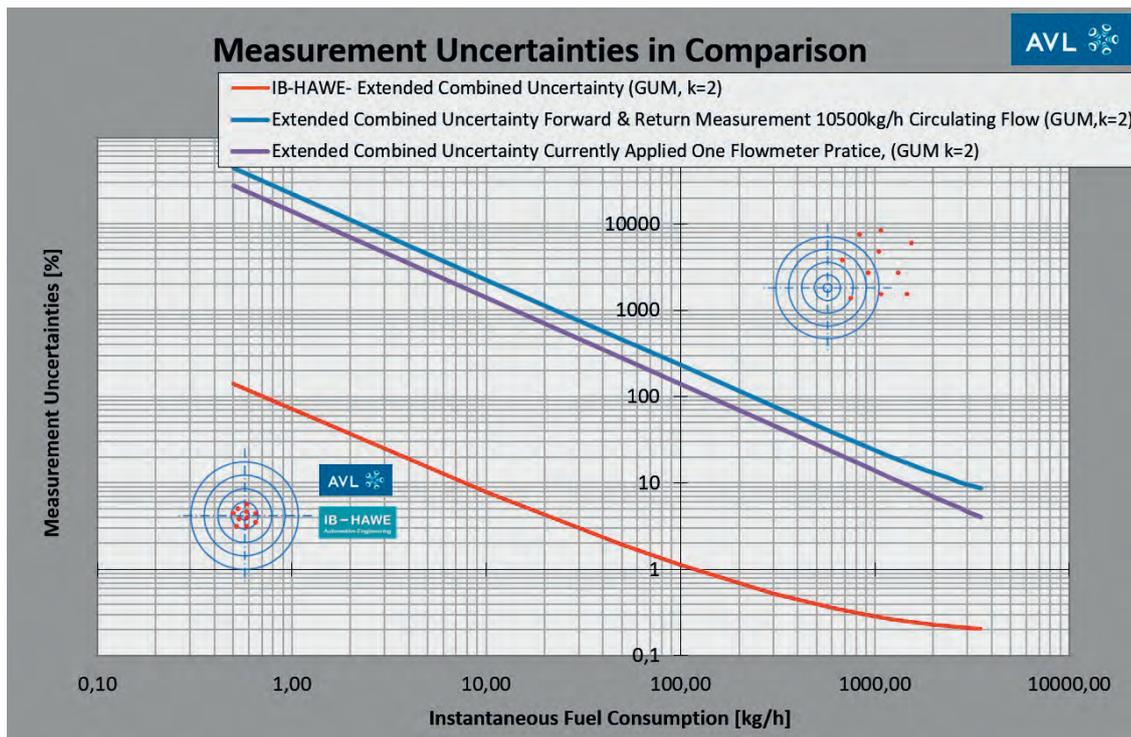


Bild 27: Gesamtmessunsicherheiten verschiedener Vorgehensweisen zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs im Vergleich

Für die Metrologie können daraus folgende Anforderungen abgeleitet werden:

- Es sind Gesamtmessunsicherheiten gemäß Bild 27 mit den in Bild 20 aufgeführten Einflussgrößen zu erreichen.
- Der Nachweis der Gesamtmessunsicherheit ist, neben der Kalibrierung der eingesetzten Messgeräte, auf eine Kalibrierung eines standardisierten Messsystems, wie in Bild 26 dargestellt, auszudehnen. Als Schnittstelle für ein Normal ist hier die Schnittstelle für die Adaption des Systems an den Motor vorzusehen.
- Sinnvolle Messbereiche reichen von 200 kg/h für kleine Motoren mit ca. 1 MW Leistung bis 8000 kg/h für große Motoren mit ca. 40 MW Leistung
 - ▷ in Messspannen von ca. 1: 40.
- Im maritimen Bereich werden die unterschiedlichsten Brennstoffe mit teilweise undefinierten Eigenschaften eingesetzt wie z. B.
 - HFO 700 mit einer Viskosität von 700 cSt bei 50 °C, das auf ca. 150 °C aufgeheizt werden muss, um in den Motor eingespritzt werden zu können.
 - Marines Dieselöl (MDO) und Marines Gasöl (MGO) mit ähnlichen aber unterschiedlichen Viskositäten und Dichten im

Vergleich zum KFZ-Diesel.

Die Kalibrierung muss eine Abschätzung der Einflussgrößen auf die Genauigkeiten durch die Verwendung der unterschiedlichen Kraftstoffeigenschaften beinhalten.

- Es müssen Prozedere für eine Überprüfung der Gesamtmessunsicherheiten der fest im Schiff verbauten Systeme definiert werden.

Literatur

- [1] P. Domjan, M. Werner, *Kraftstoffverbrauch als Messgröße für komplexe Simulationsgröße im effektiven Schiffsbetrieb*, MCN Workshop, 25. April 2018, Sunderhof
- [2] M. Witt, *NOx Reduzierung in der Seeschifffahrt*, Maritimes Cluster Norddeutschland, 4. Mai 2017, Hamburg
- [3] AVL, *Simulation and Testing Solution Catalog 2017*, AVL /Graz
- [4] M. Mohr, V. Lamatis, R. Teichmann, *Monitoring & Diagnosis Expertensystem AVL Epos für Haupt- und Hilfsmotoren*, MCN Workshop, 25. April 2018, Sunderhof Seevetal
- [5] GEA Westfalia Separator Group GmbH, *GEA Westfalia Separator ViscoBoosterUnits*.
- [6] Emerson Process Management, *Effizienter Kraftstoffverbrauch auf See*
- [7] LR Guide on the EU MRV regulations and IMO DCS, V 1.0

Kraftstoffverbrauchsmessung mit dem DP-Sensor

Alexander Weil¹

1. Einführung

Die Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs ist heute eine der wichtigsten Einflussgrößen bei der Entwicklung moderner Verbrennungsmotoren. Die Anforderungen im PKW- und Nutzfahrzeugbereich erstrecken sich vom Leerlaufverbrauch eines 1-Zylinderprüfstandes bis hin zu Vollastverbräuchen von Sport- und Nutzfahrzeugen. Hierdurch ergeben sich Kraftstoffverbrauchsbereiche von 0,2 l/h bis 400 l/h.

Ausgelöst durch die Debatte um sauberere motorische Verbrennung kommen neben den herkömmlichen Kraftstoffen (Otto- und Dieselmotoren) sowie den ethanolbasierten Kraftstoffen auch zunehmend methanolbasierte Kraftstoffe als potenzielle Energieträger für die motorische Verbrennung in Betracht. [1]

Die hierfür einzusetzende Messtechnik muss den Verbrauch dieser Medien zuverlässig messen können und auch durch ausgewählte Dichtwerkstoffe gegen diese Medien beständig sein.

2. Anforderungen an Mess- und Prüfmittel

Wie aus Bild 1 ersichtlich, sind die Anforderungen an die Mess- und Prüfmittel durch Vor-

gaben bestimmt. Diese werden durch die Entwicklungsziele sowie die Konstruktions- und Versuchsplanung definiert. Eine weitere sehr wichtige Rolle neben den Kundenanforderungen spielen die Normen und Gesetze. Aus diesen Rahmenbedingungen ergibt sich eine einzuhaltende Spezifikation. Die Kalibrierung wird durch das Kalibrierergebnis und die Langzeitstabilität beschrieben. Die Kalibrierung muss rückführbar auf das nationale Normal ausgeführt sein und die Langzeitstabilität ist über Messungen über einen längeren Zeitraum hinweg zu verifizieren. Alle Einflussgrößen, die durch die Einsatzbedingungen, den Messaufbau und die eingesetzten Mess- und Prüfmittel das Messergebnis beeinflussen können, sind zu identifizieren, in ihrer Auswirkung zu bewerten und als erweiterte Messunsicherheit (Gesamtmessunsicherheit) für den Anwender darzustellen. Die Gesamtmessunsicherheit wird neben der Kalibrierunsicherheit und der Langzeitstabilität insbesondere durch die Volumina im Messkreis, Temperatureinflüsse und Messzeiten beeinflusst. Die Abschätzung der Gesamtmessunsicherheit erfolgt nach GUM [2]. Die einzuhaltende Spezifikation ist anschließend mit der erweiterten Messunsicherheit abzugleichen. Erfüllt die Messtechnik die Spezifikation, dann eignet sich

¹ Alexander Weil, Global Product Manager „Fuel Flow“, GPMCT HORIBA Europe GmbH, E-Mail: alexander.weil@horiba.com

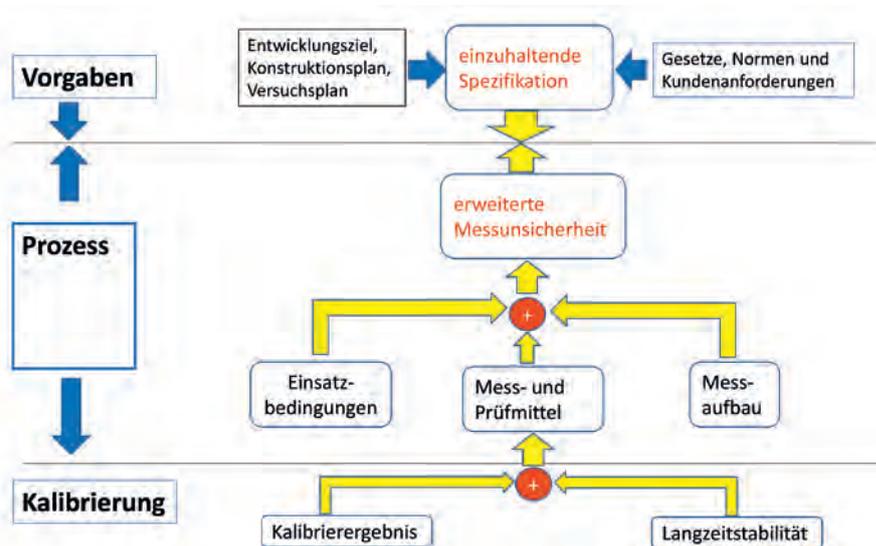


Bild 1: Anforderungen an Mess- und Prüfmittel [4]

diese für die Validierung der Messergebnisse, um die gesteckten Entwicklungsziele zu erreichen. [3]

$$Q = \frac{3,6 \cdot f}{KD}$$

3. DP-Messprinzip und Kalibrierung

Das DP- Messprinzip besteht wie in Bild 2 dargestellt aus einer Innenzahnradpumpe, einem Servomotor und einer optischen Kolbenabtastung. Eine Umdrehung des Innenzahnrads entspricht einem verdrängten Volumen von 1 cm³. Ein auf dem Servomotor montierter Drehgeber stellt eine entsprechend hohe Auflösung (1000 Impulse/ Umdrehung) sicher, sodass besonders für Kleinstmengenmessungen reproduzierbar und hochgenau gemessen werden kann.

Die Drehzahl der Innenzahnradpumpe wird durch den angekuppelten Servomotor derart geregelt, dass die Druckdifferenz (DP: *delta pressure*) zwischen Ein- und Ausgang der Pumpe zu Null wird ($\Delta p = 0$). In diesem Fall treten an der Pumpe keine Leckage-Verluste auf. Die Drehzahl des Motors ist dem geförderten Volumenstrom direkt proportional. Das Messprinzip erhält bei einem „Nulldurchfluss“ kein Signal, sodass kein Nullpunktgleich stattfinden muss. Hierdurch ergeben sich Vorteile im Vergleich zu anderen Verfahren, bei denen der Nulldurchfluss abgeglichen werden muss und, es insbesondere bei Kleinstmengenmessungen prinzipbedingte Messfehler gibt.

Zur Erfassung eines Durchflusses dient ein leichtgängig in einer Bohrung beweglicher Kolben. Die Bohrung ist hydraulisch mit dem Ein- und Ausgang der Pumpe verbunden. Über eine Lichtschranke wird die Kolbenposition erfasst und auf eine Positionsregelung aufgeschaltet, deren Ausgangssignal den Sollwert für den Drehzahlregler des Servomotors bildet. Eine Durchflussänderung bewirkt zunächst eine Verlagerung des Kolbens und damit eine Änderung des Lichtschranken-signals. Die Drehzahl des Motors wird entsprechend angepasst, bis sich der Kolben wieder in seiner ursprünglichen Lage (Mittelstellung im Lichtschranken-Fenster) befindet. Die Drehzahl des Motors entspricht nun wieder dem geänderten Durchfluss. Als Messsignal des Sensors dienen die Impulse des Drehzahlgebers, der direkt auf dem Servomotor montiert ist.

Das Messprinzip ist unabhängig von der Viskosität und der Temperatur des Mediums. Es entsteht außerdem kein Verschleiß. Dies garantiert eine hervorragende Langzeitstabilität der Kalibrierung und eine hohe Lebensdauer. Der Sensor liefert den Durchflusswert in Form eines Frequenzsignals. Der Frequenzbereich liegt im Bereich von 0 kHz bis 60 kHz für 0 l/h bis 220 l/h.

Die Berechnung des Durchflusswertes erfolgt nach der folgenden Formel:

Q = Durchfluss [l/h]

F = Frequenz [Hz]

KD= Kalibrierfaktor [Imp/cm³].

Da die Energie zum Betrieb des Volumenzählers nicht dem strömenden Medium entnommen wird, sondern nur die Strömungsbewegung über den Kolben zur Aktivierung des Servomotors benötigt wird, können Kleinstmengenmessungen bis hinunter zu 0,05 l/h durchgeführt werden. Durch die Maximaldrehzahl des Servomotors bei maximalem Durchfluss ergibt sich eine Messbereichsspanne von bis zu 1:4000. Wegen minimaler Verzugszeiten kann dieses Messprinzip insbesondere bei dynamischen Messungen eingesetzt werden. Die erweiterte relative Messunsicherheit der Kalibrierung liegt im unteren Messbereich (0,2...5 l/h) bei 0,2 % und im oberen Messbereich (5...220 l/h) bei 0,1 %. Diese durch einen Vergleich mit dem Kleinstmengenprüfstand des FB 1.5 der PTB ermittelte relative Gesamtmessunsicherheit beinhaltet bereits die Unsicherheit der KD-Faktoren des Durchflussesensors, des Vergleichsnormals, der Dichtekorrektur und der Umgebungseinflüsse. Die Kalibrierung wird an insgesamt zwölf Prüfpunkten durchgeführt. Der KD-Faktor wird für jeden Prüfpunkt aus sechs Wiederholungsmessungen ermittelt. Für die Kalibrierungen des unteren Durchflussbereichs (0,05 l/h...80 l/h) werden Büretten mit Nennvolumina von 5 ml, 25 ml, 200 ml und 1300 ml verwendet. Der Durchflussbereich von 0,2...300 l/h wird mittels eines Referenzsensors kalibriert und der obere Durchflussbereich (40 l/h...500 l/h) mittels Waage als Referenz.

Der Einsatz des DP-Sensors erfolgt vorzugsweise für Messapplikationen an Motorenprüfständen. Dieser wurde speziell für die Integration in ein Kraftstoffmess- und Konditioniersystem entwickelt.

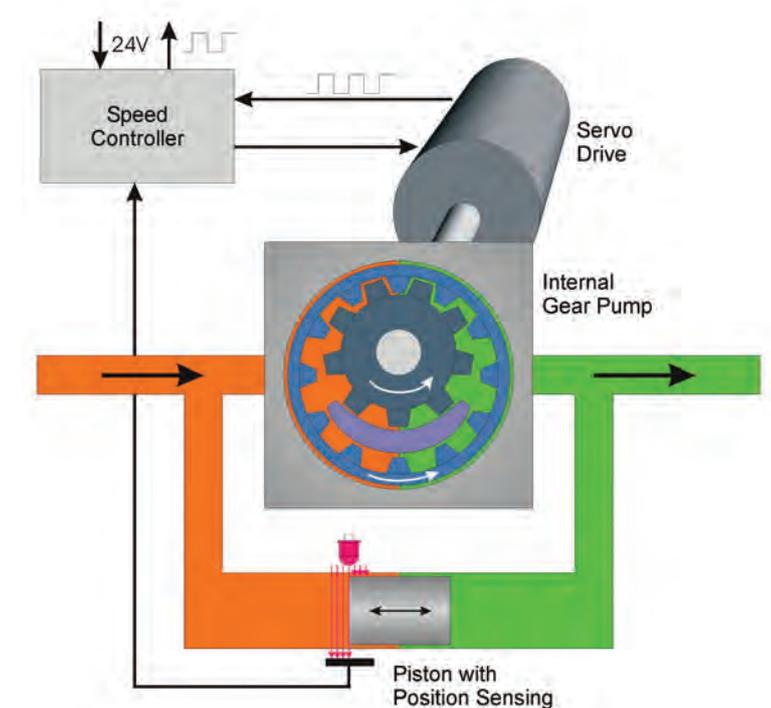
4. Aufbau eines Kraftstoffmess- und Konditioniersystems

Der in Bild 1 dargestellte Prozess erfordert optimale Einsatzbedingungen. Für eine reproduzierbare Messung müssen Druck und Temperatur exakt konditioniert werden, ansonsten entstehen zusätzliche Messfehler, die sich in der Gesamtmessunsicherheit widerspiegeln. Das Kraftstoffverbrauchsmesssystem versorgt den Hochdruckteil des Verbrennungsmotors mit den üblicherweise von der Tankpumpe bereitgestellten Drücken.

Diese variieren je nach Applikation zwischen -0,5 bar und 10 bar. Das Kraftstoffverbrauchs-messsystem besteht aus zwei Kreisläufen, die im Hydraulikschaltbild in Bild 3 dargestellt sind. Über den Einlassverteilerblock werden eventuell vorhandene Lufteinschlüsse abgeschieden. Anschließend gelangt der Kraftstoff in den Messkreis. Dort werden Kraftstoffdruck und Kraftstofftemperatur vorkonditioniert. Anschließend erfolgt die Durchflussbestimmung. Im Auslasskreis erfolgt die Konditionierung auf die für den Motor erforderliche Temperatur und den notwendigen Druck. Hierbei ist besonders die Konstanz dieser beiden Werte für eine hochgenaue und reproduzierbare Kraftstoffmessung entscheidend. Die Auslasstemperatur wird in stationären Punkten in einem Regelbereich von ±0,05 °C eingeregelt.

5. Anforderungen an die Messqualität

Um die Messqualität des Gesamtkraftstoffmess-systems bewerten zu können, müssen neben der Unsicherheitsbetrachtung der Kalibrierung (U_k) und der Langzeitstabilität (U_L) der Kalibrierfaktoren zusätzlich die Streuungen der Messwerte (U_Z) und die temperaturbedingten Volumenänderungen im Auslasskreis (U_T) während der Messungen mit betrachtet werden. In Bild 4 ist die Gesamtmessunsicherheit für den Massendurchfluss exemplarisch für ein Messkreisvolumen von 300 ml und einem Temperaturgradienten von 0,05 °C/min dargestellt. Die Messzeit beeinflusst das Messergebnis in den unteren Verbrauchsbe-reichen. Durch längere Messzeiten lassen sich pulsationsbedingte Streuungen von Pumpen her-



ausmitteln. Die Messunsicherheit der Dichte muss bei Forderungen zu gravimetrischen Verbrauchs-angaben zusätzlich mit eingerechnet werden, da der DP-Sensor den Volumendurchfluss misst. Die Einflüsse der Temperaturexpansion in den Kraftstoffleitungen lassen sich über nachfolgenden Ausdruck darstellen:

Bild 2: DP-Messprinzip

$$UT(Q_M) = \frac{dT}{dt} \cdot \beta \cdot \frac{V_{Meas}}{Q_M}$$

Hierbei gilt es, das Messkreisvolumen zu betrachten, den Ausdehnungskoeffizienten des

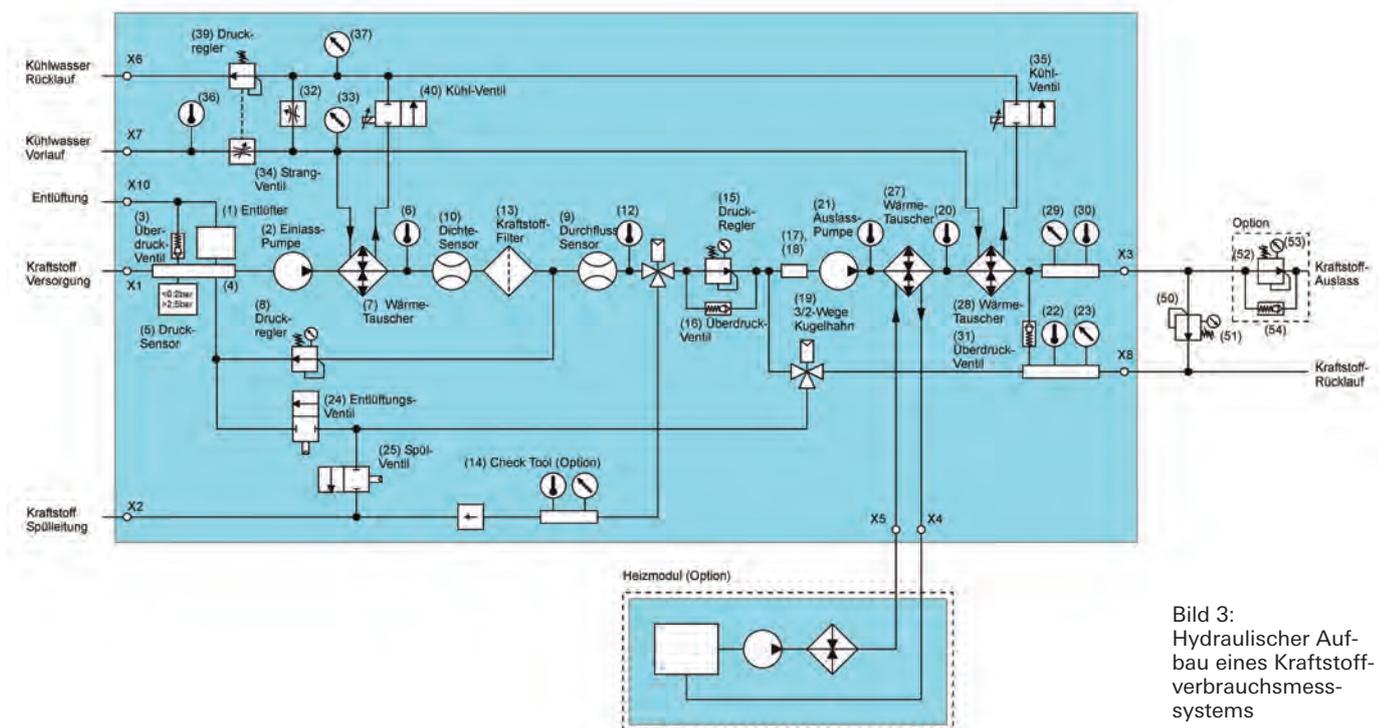


Bild 3: Hydraulischer Aufbau eines Kraftstoffverbrauchs-mess-systems

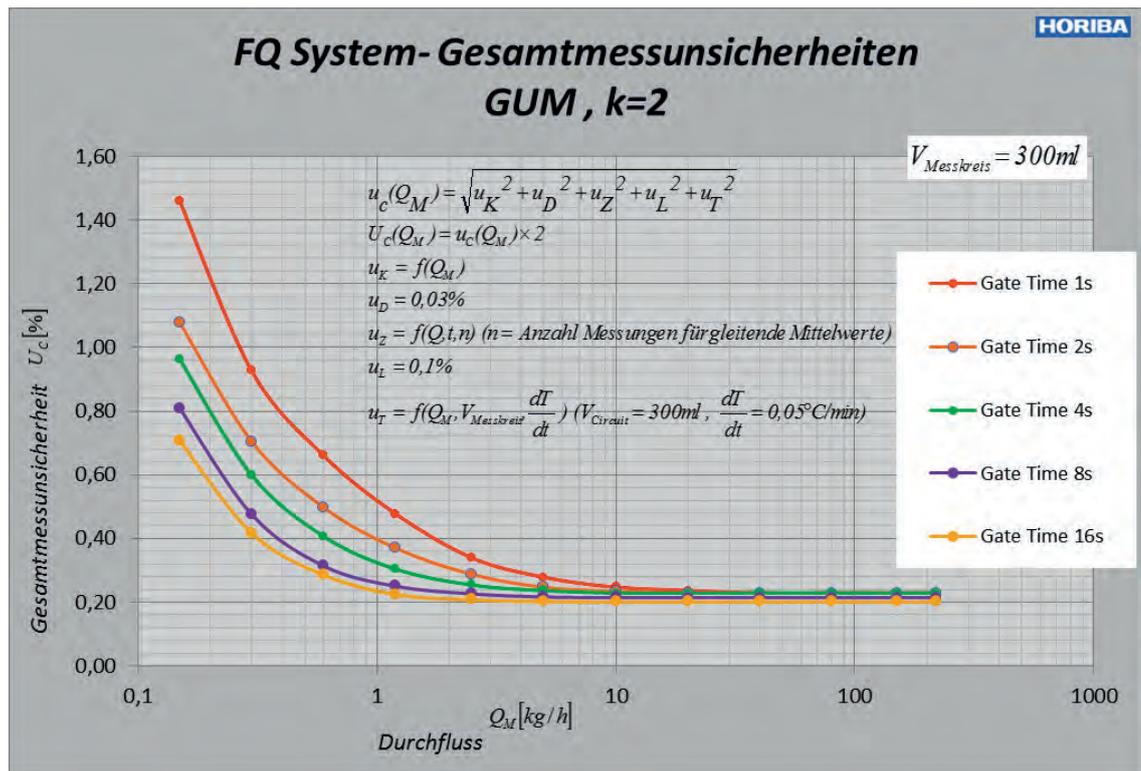


Bild 4: Darstellung der Gesamtmessunsicherheit

Mediums sowie den Temperaturgradienten im Messkreisvolumen. Das Messkreisvolumen kann für Kleinstmengenmessungen einen signifikanten Beitrag in der Gesamtmessunsicherheit darstellen, daher sollte dies bei dem Aufbau des Prüflings mitbeachtet werden. Die einzelnen Messunsicherheiten werden nach GUM quadratisch addiert. Die Abschätzung der Gesamtmessunsicherheit ist rückführbar auf nationale Normale mit den Kenngrößen **Messzeit** und **Durchfluss**. In dieser Darstellung entsprechen die Messergebnisse den Kernforderungen der Automobilindustrie, und es kann eine Gegenüberstellung mit der einzuhaltenden Spezifikation erfolgen.

6. Feldüberprüfung

Die Überprüfbarkeit der Gesamtmessunsicherheit im Prüffeld stellt eine weitere wichtige Anforderung der Automobilindustrie dar. Die Überprüfung kann mittels einer mobilen Einheit erfolgen. Der Anschluss dieser Einheit erfolgt über vorkonfektionierte Hochdruckleitungen mit Schnellverschlusskupplungen. Somit ist es möglich, das Kraftstoffverbrauchsmesssystem schnell und rückführbar vor Ort zu überprüfen. Es kann grundsätzlich zwischen zwei Prüfvarianten unterschieden werden. In der Prüfvariante des Einlasskreises (in Bild 5 dargestellt) wird gezielt die Messunsicherheit des Durchflusssensors inkl. des Einlasskreises überprüft. Sollte im Auslasskreis eine Leckage sein, geht diese in das Ergebnis mit ein. Das Gleiche gilt für Störungen (Vibrationen, Temperaturdriften), die sich über den Auslasskreis

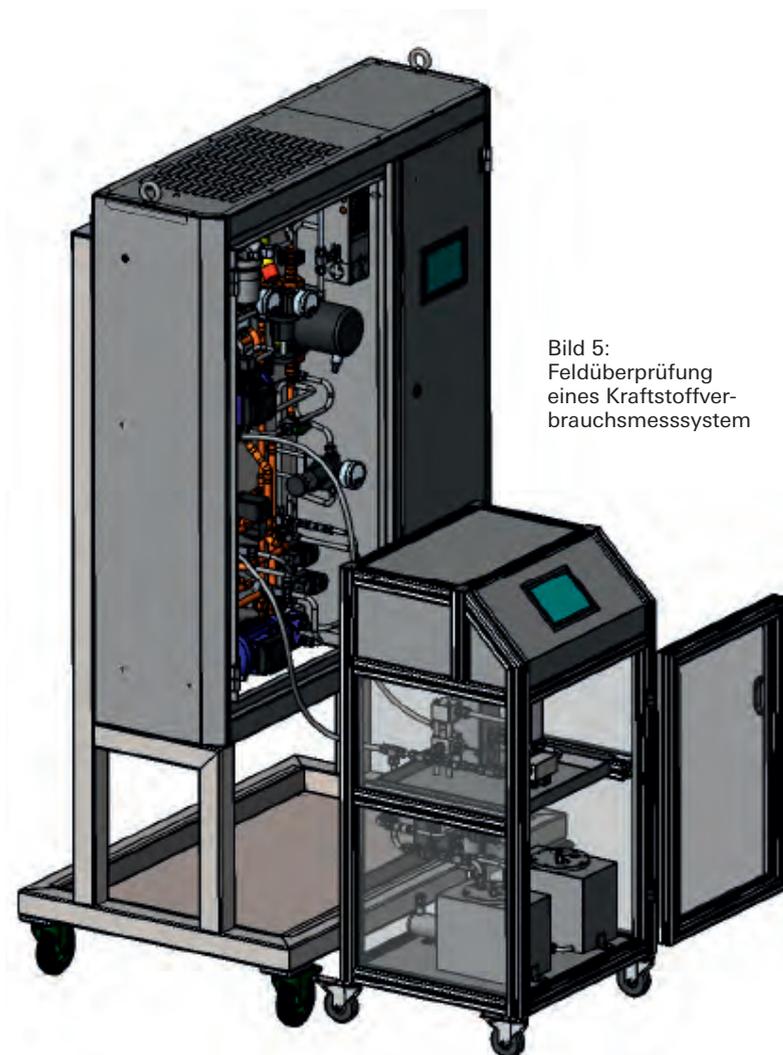


Bild 5: Feldüberprüfung eines Kraftstoffverbrauchsmesssystem

in den Zwischenkreis übertragen. In einer weiteren Prüfvariante wird das System an den externen Messkreis angeschlossen. Die bei diesem Prüfverfahren ermittelten Werte beschreiben die Messunsicherheit des gesamten Systems, d. h. alle intern (z. B. Leckagen, fehlerhafte Temperaturregelung, Pumpendefekt, Druckregler defekt) wie extern wirkenden Fehler (z. B. extreme Umgebungstemperaturschwankungen, Vibrationen, Stöße) gehen in das Messergebnis ein.

7. Zusammenfassung

Das DP-Messprinzip ist für die Genauigkeitsanforderungen hinsichtlich der Messaufgaben im Bereich der Forschung und Entwicklung von Verbrennungsmotoren optimal ausgeführt. Die Einflussgrößen lassen sich nachvollziehbar nach GUM auf das nationale Normal rückführen. Eine hochgenaue Konditionierung garantiert eine gute Reproduzierbarkeit der Messergebnisse auch im Bereich von Kleinstmengenmessungen. Ein großer Vorteil des Messprinzips ist die Langzeitstabilität des Kalibrierfaktors. Dadurch lassen sich Messungen über längere Zeit direkt miteinander vergleichen. Durch automatisierte Feldüberprüfung wird eine schnelle und standardisierte Rückführung der Messergebnisse gewährleistet.

Das Kraftstoffverbrauchsmesssystem erfüllt in vollem Umfang die Forderungen der Automobilindustrie.

Literatur

- [1] A. Omai; B. Heuser; S. Pischinger, *Potential of oxymethylenether-diesel blends for ultra-low emission engines*. In: Fuel 209 (2017), S. 232–237
- [2] ISO/IEC Guide 98-3:2008-09
- [3] Internationale Organisation für Normung, [*ISO/IEC Guide 98-3:2008: Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement*](#). ISO, Genf 2008
- [4] J. Stroscherer, *Untersuchung von Einflussgrößen bei der Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs an Motoren unter realen Betriebsbedingungen*. Bachelorarbeit, Otto von Guericke Universität Magdeburg (2012)

Kavitationsdüsen – Eine neue Technologie für die Durchflussmessung von Flüssigkeiten

Daniel Schumann*

Kavitation ist ein allgemein bekannter Effekt in der Fluidmechanik. Dieser wird meist mit negativen Folgen assoziiert, wie z. B. den materialzerstörenden Eigenschaften bei Schiffsschrauben, Saugrohren von Pumpen, oder Turbinenrädern. Dabei weist Kavitation aber auch eine Reihe von sehr nützlichen technischen Anwendungsmöglichkeiten auf, beispielsweise für die Reinigung von Oberflächen, die Treibstoffeinspritzung in Dieselmotoren oder das Verdrillen von Chemiefasern in der Textilindustrie.

Grundlegend bedeutet Kavitation (lat. *cavitas* „Hohlraum“) die Bildung und Auflösung von mit Dampf gefüllten Hohlräumen in einer Flüssigkeit. Physikalisch betrachtet entspricht Kavitation dem Sieden. Unter Atmosphärendruck siedet beispielsweise Wasser auf Meeresspiegelhöhe bei einer Temperatur von 100 °C. Wird der Druck vermindert, erfolgt der Übergang in die gasförmige Phase schon bei geringerer Temperatur. Den Absolutdruck, bei dem dieser Übergang stattfindet, bezeichnet man als Dampfdruck. Bild 1 verdeutlicht beide Möglichkeiten, Temperaturerhöhung und Druckreduzierung, die zur Unterschreitung des Dampfdruckes und somit zum Übergang in die gasförmige Phase führen.

Innerhalb von Strömungsvorgängen erfolgt die Bildung und Auflösung von Kavitationsblasen

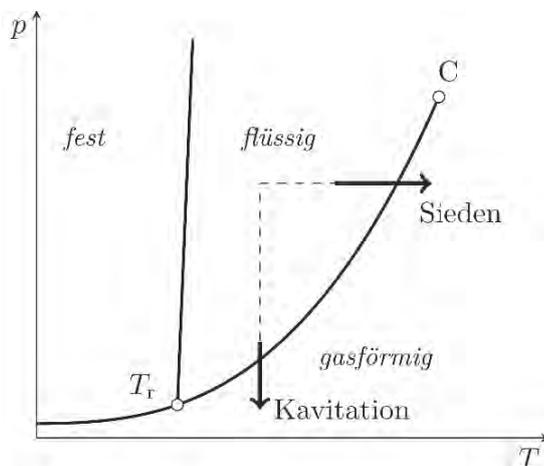


Bild 1:
Phasendiagramm von Wasser mit C als kritischem Punkt und T_r als Tripelpunkt.

üblicherweise so schnell, dass sich lokale Wasserschläge ausbilden, welche sich materialzerstörend auswirken können.

Ein neueres Anwendungsgebiet der Kavitation ist der Einsatz als sogenannte kavitierende Düse, bzw. Kavitationsdüse, für die Durchflussmessung, Regelorgan oder zur Erzeugung dynamischer Durchflussprofile. Dabei wird Kavitation innerhalb eines Herschel-Venturi-Rohres erzeugt. Die Nutzung von kavitierenden Düsen als Regelorgan ist jedoch keine neuzeitliche Anwendung. Im Bereich der Gas-Durchflussmessung sind sogenannte kritische Düsen bereits als stabiles und akkurates Messprinzip mit hoher Wiederholbarkeit seit einigen Jahrzehnten bekannt. Sie sind als Transferstandard oder Prüfgerät etabliert.

Kavitierende Düsen basieren auf dem gleichen physikalischen Prinzip wie die kritischen Düsen. Während sich bei kritischen Düsen durch die Verengung des Querschnittes die Strömungsgeschwindigkeit der lokalen Schallgeschwindigkeit angleicht und so ein kritischer Massenstrom erreicht wird, wird bei kavitierenden Düsen der statische Druck lokal bis zum Dampfdruck p_v abgesenkt, wodurch Kavitation initiiert wird (s. Bild 2).

Im Ergebnis bilden sich konstant Kavitationsblasen im Düsenhals (Bild 2 rechts). Durch die lokal begrenzt auftretende Kavitation stellt sich ein maximaler Flüssigkeitsstrom ein.

Somit basieren kavitierende Düsen im Grunde auf dem Prinzip der Wirkdruckmessgeräte und können mittels Gleichung 1 aus ISO 5167 berechnet werden

$$q_m = \frac{C_D}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p p_1} \quad (1)$$

mit:

q_m :	Massenstrom
C_D :	Durchflusskoeffizient
$\beta=d/D$:	Durchmesser Verhältnis
ε :	Expansionszahl, Kenngröße für die Kompressibilität von Fluiden, bei inkompressiblen Medien $\varepsilon=1$
d :	Düsenhalsdurchmesser
$\Delta p=p-p_v$:	Wirkdruck
ρ_1 :	Fluiddichte.

* Daniel Schumann,
Arbeitsgemeinschaft
„Weitergabe
Flüssigkeitsmenge“,
PTB Braunschweig,
E-Mail:
daniel.schumann@ptb.de

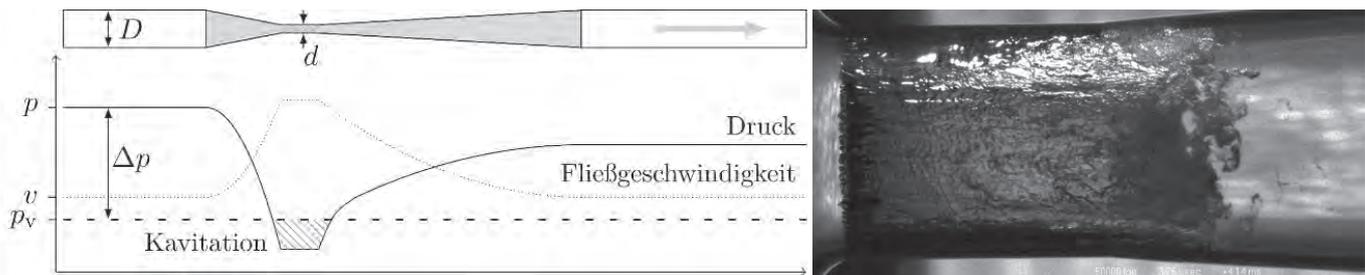


Bild 2:
Links: Schematische Darstellung einer Herschel-Venturi-Düse (grauer Bereich), inklusive des schematischen Verlaufs der Druck- und Geschwindigkeitskurven über die Düsengeometrie
Rechts: Ausschnitt einer Highspeedaufnahme einer kavitierenden Herschel-Venturi-Düse aus Plexiglas

Wird das nötige kritische Druckverhältnis erreicht, stellt sich ein stabiler Durchfluss ein, welcher abhängig vom Eingangsdruck ist. Aufgrund der hohen Fließgeschwindigkeit innerhalb des Düsenhalses wird die auftretende Kavitation weiter transportiert und löst sich im Bereich des Diffusors auf. Dadurch treten keine materialzerstörenden Einflüsse auf nachfolgende Einbauten auf.

Die Kavitationsdüse ist durch ihre physikalischen und technischen Eigenschaften vielfältig nutzbar, so unter anderem als Durchflussregler. Dazu wurden Versuche auf einem Durchflussprüfstand der PTB durchgeführt. Es wurde eine Turbine als Durchflussmessgerät installiert und die Impulslängen der einzelnen Schaufelräder der Turbine geloggt. Die Messkampagne beinhaltete vier Versuchsreihen. Die erste Versuchsreihe galt der Untersuchung der Durchflussstabilität während des normalen Kalibrierbetriebes der Anlage. Dabei wird der Durchfluss über Pumpen erzeugt und durch pneumatische Ventile reguliert. Innerhalb der zweiten Versuchsreihe wurden die pneumatischen Ventile durch eine Kavitationsdüse ersetzt. Versuchsreihe 3 und 4 diente zur Validierung der Ergebnisse, indem der gleiche Versuchsaufbau verwendet wurde, jedoch die Durchflusserzeugung über einen Hochbehälter realisiert wurde.

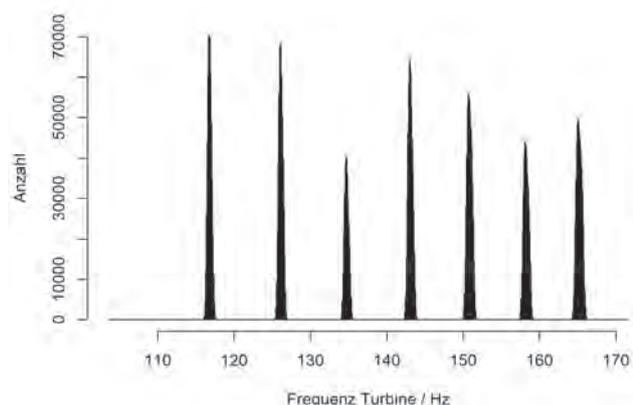
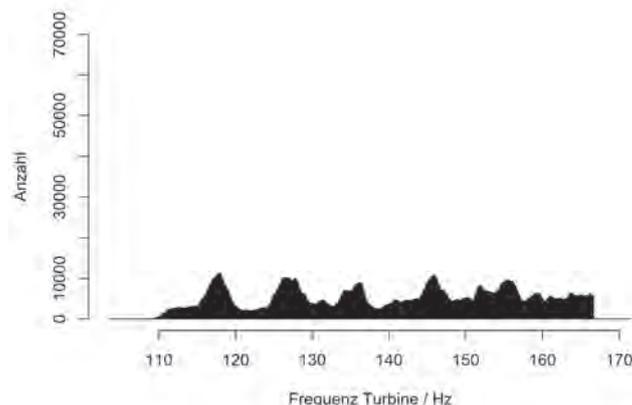
Bild 3 zeigt deutlich den Unterschied zwischen beiden Regelungen. Der klassische Regelungsmodus mittels Pumpe und pneumatischem Regelventil (Bild 3, links) erzeugt einige lokale Maxima bei den entsprechenden Durchflüssen mit einer erheblichen Anzahl an Nebenmaxima. Die Grenzen

zwischen den einzelnen Durchflusspunkten verschwimmen, sodass eine klare Abgrenzung nicht gegeben ist. Zusätzlich erhöht sich die Anzahl der Nebenmaxima mit zunehmender Fließgeschwindigkeit. Im Gegensatz dazu steht das Ergebnis mit einer Kavitationsdüse als Regelorgan (Bild 3, rechts). Hier können deutlich sieben Einzelpeaks identifiziert werden. Diese normalverteilten Signale der Turbine belegen die Durchflussstabilität der Kavitationsdüse.

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit der Kavitationsdüse ist die Generierung von wechselnden Durchflüssen. Da sich die Kavitationsschicht bei ausreichendem Druckunterschied innerhalb von Millisekunden ausbildet, können mehrere Düsen unterschiedlichen Durchmessers parallelgeschaltet werden. In diesem Anwendungsfall addieren sich die Einzelvolumenströme der Düsen. Hierfür hat die PTB, in Kooperation mit einer auf Gasprüfstände spezialisierten Firma, einen ersten Prototyp entwickelt und gebaut (s. Bild 4).

Innerhalb dieser Einheit befinden sich 6 konzentrisch angeordnete Kavitationsdüsen (C), die mittels pneumatischer Stempel (A) geöffnet oder geschlossen werden können. Es kann derzeit ein Durchflussbereich von 100 l/h – 5400 l/h abgedeckt werden. Diese Apparatur wird mit Wasser betrieben und ist aufgrund ihrer Größe mobil in Prüfständen einsetzbar. Die Düsen im Inneren können beliebig gewechselt werden, sodass eine Durchflusserweiterung möglich ist. Des Weiteren hat der Fachbereich 1.5 eine kleinere Variante dieser Einheit gebaut.

Bild 3:
Links: Anzahl der Impulse der Turbine bei Pumpenbetrieb mit Regelventil
Rechts: Anzahl der Impulse der Turbine bei Pumpenbetrieb mit Kavitationsdüse



In Bild 5 ist der sogenannte „Little Boy“ dargestellt. Das Funktionsprinzip ist analog zu „Big Boy“. Ein wesentlicher Unterschied der beiden Apparaturen ist, dass die kleinere lediglich 3 Kavitationsdüsen beinhaltet, aber durch ihre Konstruktion medienunabhängig ist. Derzeit wird die Apparatur mit HAKU betrieben, welches als Kraftstoffersatz an einzelnen Prüfständen innerhalb des Fachbereichs verwendet wird.

Mit diesen beiden Apparaturen ist es möglich, dynamisch wechselnde Durchflüsse, wie z. B. ein häusliches Wasserverbrauchsprofil oder den Kraftstoffverbrauch während eines Fahrzyklus zu generieren. Erste Untersuchungen belegen die hohe Reproduzierbarkeit der erzeugten Durchflussprofile. In Bild 6 sind ein solches Test-Durchflussprofil und die Reaktion eines handelsüblichen Haushaltswasserzählers beispielhaft dargestellt.

Da Fahrzyklen als Geschwindigkeitsprofile über eine definierte Messzeit angegeben werden (s. Bild 7) wird für die Nachbildung am Durchflussprüfstand das Geschwindigkeitsprofil mit einem fiktiven Motor und einem mittleren Verbrauch des Motors für die jeweilige Geschwindigkeit in einen Kraftstoffverbrauch umgerechnet.

Die durchgeführten Untersuchungen belegen, dass das Prinzip der kavitierenden Herschel-Venturi-Düse auch im Flüssigkeitsbereich funktioniert. Die Düsen können mit unterschiedlichen Fluiden betrieben werden.

Ein wichtiger Punkt für den Einsatz im Flüssigkeitsbereich ist der Nachweis, dass innerhalb eines langfristigen Betriebs keine materialzerstörenden Eigenschaften, sowohl innerhalb der gefertigten Düse als auch auf das nachfolgende System, auftreten. Dieser Nachweis ist im Rahmen von Langzeituntersuchungen noch zu erbringen. Die bisherigen Messungen belegen des Weiteren, dass es sich bei der Durchflusserzeugung und Regelung um wiederhol- und reproduzierbare Durchflüsse in der Größenordnung von $1 \cdot 10^{-4}$ handelt.

Derzeitig werden am Fachbereich stochastisch gesicherte Referenzprofile für die Prüfung von

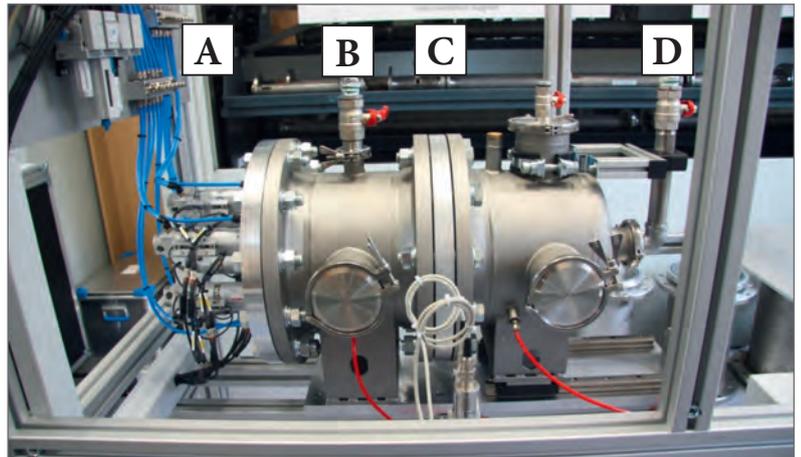


Bild 4: Kavitationsdüsenapparatur „Big Boy“, A: pneumatische Stempel, B: Auslauf, C: Platte mit installierten Düsen, D: Einlass.



Bild 5: Kavitationsdüsenapparatur „Little Boy“ mit 3 parallel betriebenen Kavitationsdüsen

Wasserzählern unter dynamischen Bedingungen entwickelt. Des Weiteren werden Fahrzyklen nachgebildet, um ebenfalls den Kraftstoffverbrauch unter dynamischen Bedingungen genauer bestimmen zu können. Darüber hinaus werden Untersuchungen mit Kavitationsdüsen auf andere Fluide ausgeweitet. Die Erweiterung der Untersuchungen ist notwendig, um eine allgemein gültige, medienunabhängige Charakterisierung der Kavitationsdüsen gewährleisten zu können.

Bild 7: Ausgewählte, aktuell verwendete Fahrzyklen

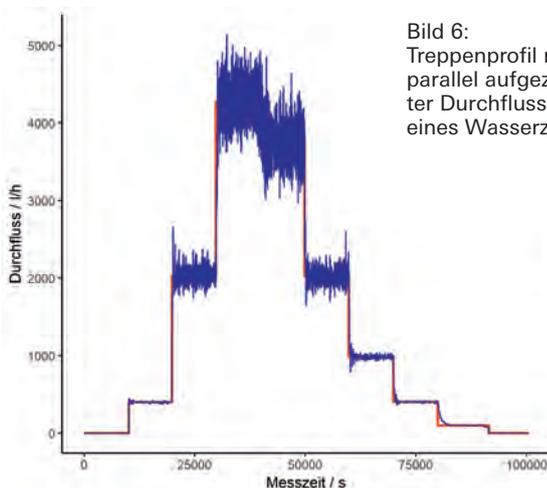
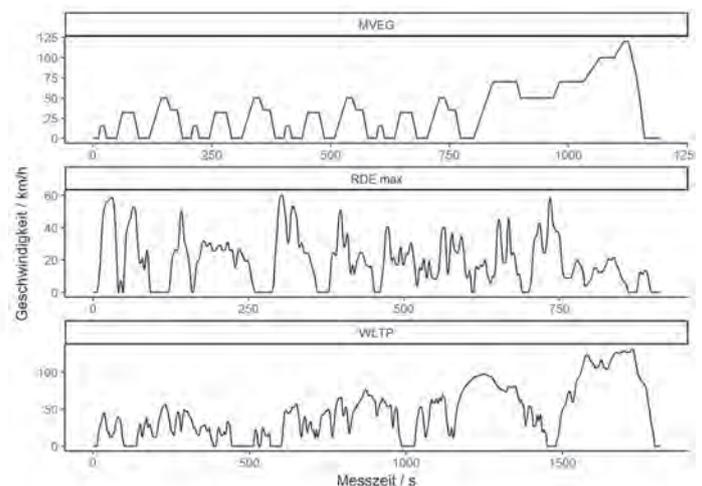


Bild 6: Treppenprofil mit parallel aufgezeichnete Durchflussanzeige eines Wasserzählers



Messung kleiner Volumenströme in der Medizintechnik

Stephan Klein*

Abstract

Dieser Beitrag stellt die wesentlichen Inhalte eines gleichnamigen Übersichtsvortrags auf dem 310. PTB-Seminar „Metrologie im Fluss“ zusammen, das am 8. und 9. November 2018 in Braunschweig durchgeführt wurde. Zunächst wird der Bereich „Medizintechnik“ anhand der Europäischen Medizinprodukte-Verordnung abgegrenzt und einige Beispiele von Medizinprodukten werden vorgestellt, bei denen die Handhabung von Flüssigkeiten ein wichtiger Bestandteil der Funktionserfüllung ist. Anschließend werden gegenwärtig in der Medizintechnik eingesetzte Flow-Sensoren und Ansätze neuer Messprinzipien aufgeführt. Zum Abschluss werden Ergebnisse des europäischen Metrologieprojektes „Metrology for Drug Delivery I“ und die Planungen für dessen Fortsetzung beschrieben.

Einleitung

Zur Abgrenzung der „Medizintechnik“ soll hier die Begriffsbestimmung „Medizinprodukt“ aus der EU-Verordnung 2017/745 über Medizinprodukte herangezogen werden [1], (Bild 1). Medizinprodukte werden danach also dadurch definiert, wie sie ihre Hauptwirkung nicht erreichen (nicht pharmakologisch, nicht immunologisch bzw. nicht metabolisch). Generell werden die Hauptwirkungen von Medizinprodukten danach im weitesten Sinne physikalisch (thermisch, elektrisch, mechanisch etc.) erzielt. So sind auch Medizinprodukte bekannt, die trotz der oralen Einnahme in Tablettenform kein Arzneimittel sind, weil der Wirkmechanismus auf physikalischen Effekten beruht¹. Medizinprodukte können je nach betrachtetem Aspekt nach verschiedenen Kriterien eingeteilt werden [2]:

* Prof. Dr.-Ing. Stephan Klein, „Medizinische Sensor- und Gerätetechnik“, Technische Hochschule Lübeck, E-Mail: stephan.klein@th-luebeck.de

„**Medizinprodukt**“ bezeichnet ein Instrument, einen Apparat, ein Gerät, eine Software, ein Implantat, ein Reagenz, ein Material oder einen anderen Gegenstand, das dem Hersteller zufolge für Menschen bestimmt ist und allein oder in Kombination einen oder mehrere der folgenden spezifischen **medizinischen Zwecke** erfüllen soll:

Diagnose, Verhütung, Überwachung, Vorhersage, Prognose, Behandlung oder Linderung von Krankheiten,
Diagnose, Überwachung, Behandlung, Linderung von oder Kompensierung von Verletzungen oder Behinderungen,
Untersuchung, Ersatz oder Veränderung der Anatomie oder eines physiologischen oder pathologischen Vorgangs oder Zustands,
Gewinnung von Informationen durch die In-vitro-Untersuchung von aus dem menschlichen Körper - auch aus Organ-, Blut- und Gewebespenden - stammenden Proben

und dessen **bestimmungsgemäße Hauptwirkung** im oder am menschlichen Körper **weder durch pharmakologische oder immunologische Mittel noch metabolisch** erreicht wird, dessen Wirkungsweise aber durch solche Mittel unterstützt werden kann. Die folgenden Produkte gelten ebenfalls als Medizinprodukte:

Produkte zur Empfängnisverhütung oder -förderung,
Produkte, die speziell für die Reinigung, Desinfektion oder Sterilisation der in Artikel 1 Absatz 4 genannten Produkte und der in Absatz 1 dieses Spiegelstrichs genannten Produkte bestimmt sind.

¹ Ein Beispiel dazu ist das Medizinprodukt „Levax intens“ der Fa. Bayer, das bei Magen-Darmbeschwerden in Tablettenform verabreicht wird. https://www.lefax.de/static/documents/Beipackzettel_Lefax_intens_FI%C3%BCssigkapsel.pdf, Zugriff: 27.12.2018

Bild 1: Definition eines Medizinproduktes (Hervorhebungen durch den Autor) [1]

Invasivität der Informationserfassung bzw. des Eingriffs:

- **nichtinvasiv**, z. B. Ultraschallbildgebung, Oberflächen-EKG
- **invasiv** (dringt durch Körperoberfläche oder über eine Körperöffnung ganz oder teilweise in den Körper ein), z. B. Herzschrittmacherimplantation, Messung des zentralvenösen Blutdrucks

Ort der Anwendung, der Art des Verfahrens:

- **in vivo** (im/am lebenden Objekt), z. B. Operationsmikroskopie
- **in situ** (in natürlicher Lage im Körper), z. B. Stent-Implantation
- **ex vivo** (außerhalb des Körpers, z. B. nach Entnahme), z. B. Spektroskopie am Tumor-Schnellschnitt
- **in vitro** (im Reagenzglas), z. B. Züchtung von Stammzellen
- **in silico** (am Computer), z. B. Bestrahlungsplanung in der Nuklearmedizin

Dauer der Anwendung:

- **vorübergehend** (weniger als 60 Minuten), z. B. Operationsinstrumentarium
- **kurzzeitig** (bis zu 30 Tagen), z. B. Beatmung (> 1 Woche)
- **langzeitig** (mehr als 30 Tage), z. B. Herzschrittmacher
- **ununterbrochen**, z. B. künstliche Herzklappe (günstigenfalls lebenslang)

Wiederverwendbarkeit

- **Einmalgebrauch**
- **Mehrfachgebrauch**

Die im Bereich der Entwicklung und „Zulassung“² am häufigsten relevante Einteilung in die vier Risikoklassen I, II a, II b, III erfolgt jedoch nach den bei der Anwendung zu erwartenden Risiken, die nach einem Entscheidungsbaum der o. g. EU-Verordnung bewertet werden:

- **Klasse I** (geringes Risiko): Medical Apps, Lesebrillen, Rollstühle, Mullbinden;
- **Klasse II a** (mittleres Risiko): Zahnfüllungen, Röntgenfilme, Hörgeräte, Ultraschallgeräte;
- **Klasse II b** (hohes Risiko): Intraokularlinsen, Kondome, Röntgengeräte, Infusionspumpen;

- **Klasse III** (sehr hohes Risiko): Hüft- und Kniegelenkimplantate, Herzkatheter, Brustimplantate.

Von den 81.217 in den Jahren 2005–2016 beim Bundesamt für Arzneimittel und Medizinprodukte – BfArM eingegangenen Risikomeldungen betrafen 17.670, also fast 22 %, die beiden Produktgruppen Injektion / Infusion / Transfusion / Dialyse und In-vitro-Diagnostika, die im Folgenden kurz angesprochen werden sollen [3]. In dieser Statistik wird jedoch nicht weiter nach den Ursachen der Meldungen spezifiziert, die sowohl in den Geräten selbst als auch in der Handhabung liegen können. Nach anderen Quellen wird in der Infusion ein Großteil der Zwischenfälle durch Anwender verursacht [4].

Medizinprodukte mit Flüssigkeitshandhabung als Bestandteil der Hauptfunktion

Die Strömung von Flüssigkeiten inner- und außerhalb des menschlichen Körpers spielt eine wichtige Rolle in der Medizintechnik. Sicherheit und Zuverlässigkeit zahlreicher Medizinprodukte erfordern die sichere und zuverlässige Handhabung verschiedener Volumenströme. Deren Bereich reicht von mehreren l/min (Herz-Lungen-Maschine) bis zu einigen nl/min (Medikamentenapplikation)³. Einige dieser Medizinprodukte bzw. Anwendungen sollen hier beispielhaft vorgestellt werden:

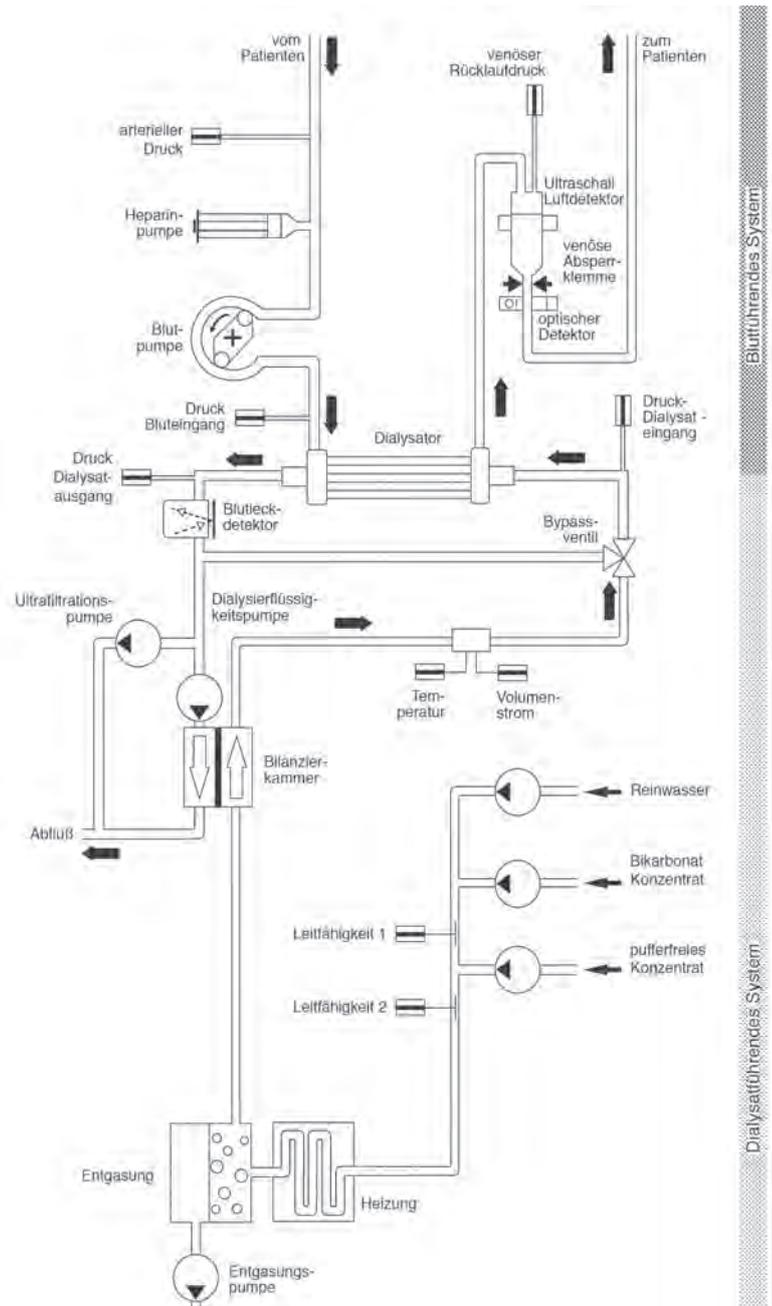
- **Herz-Lungenmaschinen** werden eingesetzt, um den Blutkreislauf während operativer Eingriffe am Herzen aufrecht zu halten und die Oxygenierung des Blutes zu ermöglichen. Dabei werden Volumenströme von mehreren l/min erreicht.
- Unter **parenteraler Ernährung** wird die venöse Verabreichung von Nährstofflösungen bei Patienten verstanden, deren Magen-Darm-Trakt nicht zur Nahrungsaufnahme geeignet ist, z. B. nach einer Operation. Bei diesen Anwendungen werden Volumenströme von mehreren l/24 h erreicht. Dabei wird die Infusionsflüssigkeit entsprechend des individuellen Bedarfs des Patienten zusammengesetzt (u. a. Aminosäuren, Kohlenhydrate, Fett, Natrium, Kalium oder Phosphat).
- **Dialysegeräte** dienen der Nierenersatztherapie. Die beiden technisch ersetzbaren Hauptaufgaben der Niere sind die Ausscheidung von sowohl Stoffwechselendprodukten als auch Giften und Medikamenten sowie die Regulation des Wasser- und Elektrolythaushaltes [2]. Ein Hämodialysesystem besteht aus einem extrakorporalen Blut- und einem Dialysat-

² Eine Zulassung im Sinne eines hoheitlichen Aktes einer Behörde ist innerhalb der EU vor der Markteinführung eines Medizinproduktes - anders als in anderen Staaten - nicht vorgesehen, daher wird der Begriff „Zulassung“ hier mit Anführungszeichen verwendet. In der EU wird im Rahmen eines Konformitätsbewertungsverfahrens vor dem Inverkehrbringen festgestellt, ob die Richtlinien der EU eingehalten werden.

³ 1 nl entspricht einem Würfel mit einer Kantenlänge von 0,1 mm

kreislauf, deren Austausch in einem Dialysator erfolgt, in dem Blut und Dialyseflüssigkeit durch eine semipermeable Membran getrennt sind. Peristaltikpumpen in der Ausführung als Rollenpumpe (radial angeordnete Rollen quetschen einen Schlauch) fördern diese Kreisläufe. Der Dialysator wird auf der Blutseite mit ca. 100 – 300 ml/min und auf der Dialysatseite in der Regel mit ca. 500 ml/min durchströmt (Bild 2).

- In der Diabetes-Therapie werden batteriebetriebene **Insulinpumpen** eingesetzt, die am Körper getragen werden und üblicherweise ein Volumen von wenigen ml Insulin aufnehmen können. Die erforderliche Dosis – und damit die Förderrate – schwankt in Abhängigkeit von der Ernährung, der Tageszeit und der körperlichen Aktivität und wird dem Benutzer i. d. R. in U/min (*Units/Minute* also *Insulineinheiten/Minute*) angezeigt. Der Volumenstrom beträgt im Mittel unter Berücksichtigung möglicher Bolusgaben einige ml/24 h.
- Bei **extrakorporalen Infusionspumpen** haben zwei Bauformen Bedeutung erlangt: **Peristaltikpumpen**, die in der Ausführung als Fingerpumpen mit linear angeordneten „Fingern“ einen Schlauch in einer peristaltischen Bewegung so bewegen, dass sie das sich im Schlauch befindende Medium fördern sowie **Spritzenpumpen**, bei denen der Kolben der mit dem zu applizierenden Medikament gefüllten Spritze (i. d. R. 50 ml) von der Pumpe bewegt wird. Es werden Volumenströme von ca. 0,1 ml/h bis zu 50 ml/h appliziert.
- Implantierbare Infusionspumpen** werden überwiegend in der Schmerz- und Spastiktherapie eingesetzt und im Bauchraum implantiert. Ein Katheter führt zum Wirkort des Medikamentes, das ohne unerwünschte Wirkungen oder Verdünnung im Blut zugeführt wird, z. B. unmittelbar dem Spinalraum im Rückenmark. Die Befüllung erfolgt durch Punktion mit nicht stanzenden Nadeln durch ein Silikon-Septum. Zwei Bauformen sind am Markt eingeführt, elektrische Rollenpumpen und gasgetriebene Pumpen (Bild 3). Diese bestehen aus einem Titangehäuse, das mit einem Zwei-Phasen-Gemisch als Treibmittel (i. d. R. n-Butan mit konstantem Dampfdruck von ca. 3,4 bar absolut bei konstanter Körpertemperatur) gefüllt ist. Der Druck fördert das sich in einer flexiblen Kammer befindende Medikament durch eine Drosselstrecke, die nach dem Gesetz von Hagen-Poiseuille den Fluss bestimmt, in den Katheter und zum Wirkort. Bei Volumenströmen zwischen ca.

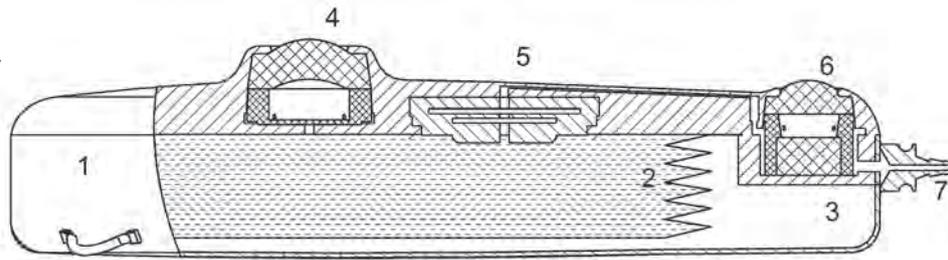


0,25 ml/24 h und ca. 3,0 ml/24 h erlauben die Pumpen Nachfüllintervalle von ca. 30 Tagen. Die Volumenänderung innerhalb des Treibmittelraumes wird durch Verdampfen bzw. Kondensation des Treibmittels kompensiert, solange zwei Phasen vorliegen. Beim Nachfüllen der Pumpe mit einer speziellen Nadel durch das Füllseptum wird die Medikamentenkammer expandiert und ein Teil des Treibmittels kondensiert, sodass mit der Körperwärme als Energiequelle ein erneuter Entladungszyklus beginnt [2].

Bild 2: Funktionsprinzip eines Dialysegerätes mit dem Dialysator in der Mitte und den beiden Flüssigkeitskreisläufen [2]

- Der Begriff „In-vitro-Diagnostikum“ bezeichnet ein Medizinprodukt, das als Reagenz, ... Instrument, ... Gerät, Software oder System ... vom Hersteller zur In-vitro-Untersuchung

Bild 3:
Implantierbare Infusionspumpe.
1 Titangehäuse mit Nahtösen,
2 flexible Medikamentenkammer,
3 Treibmittel (zwei Phasen),
4 Septum zum Nachfüllen der
Pumpe,
5 Drosselstrecke,
6 Septum mit direktem
Katheterzugang (Bolusgabe,
Katheterspülung),
7 Katheteranschluss [2]



von aus dem menschlichen Körper stammenden Proben, einschließlich Blut und Gewebespunden, bestimmt ist und ... dazu dient, Informationen ... zu liefern, u. a. über physiologische oder pathologische Prozesse oder Zustände, ... über die Prädisposition für einen bestimmten gesundheitlichen Zustand oder eine bestimmte Krankheit oder ... zur Feststellung der Unbedenklichkeit und Verträglichkeit bei den potenziellen Empfängern [5].
Bei der Prozessierung des Probenmaterials spielt die exakte Dosierung von Reagenzien eine wichtige Rolle. Dabei steht weniger ein Volumenstrom als eher die Dosierung einzelner Volumina durch Pipettieradeln im Vordergrund. Diese Nadeln haben ein Pipettiervolumen von 5 µl bis 1.100 µl, das in Schritten von 1 µl appliziert werden kann (Bild 4).

- die Anzeige des Ergebnisses in legalen Einheiten der Richtlinie 80/181/EEC erfolgt oder ein Vergleich mit einem Referenzwert, der ebenfalls in diesen Einheiten angegeben sein muss, erfolgt und
- die Genauigkeit gegeben sein muss, um schwerwiegende unerwünschte Ereignisse zu vermeiden, und die in der Zweckbestimmung genannt ist oder aufgrund der Zweckbestimmung vermutet werden kann.

Medizinprodukte mit Messfunktion werden in der Anlage 2 der Betreiberverordnung aufgeführt und müssen regelmäßigen „Messtechnischen Kontrollen“ unterzogen werden [6, 7].

Sensorprinzipien für die Messung von Flüssigkeitsströmen in der Medizintechnik

Bei der Messung von Volumenströmen in Medizinprodukten muss beachtet werden, dass bei vielen Anwendungen die Flüssigkeitsführung in Einwegprodukten erfolgen muss, um Kontamination der Patienten zu vermeiden. Dementsprechend werden Volumenstromsensoren eingesetzt, die durch die Wandung kontaktlos in Schläuchen messen können. Dies sind u. a. Ultraschall-Sensoren, die z. B. in Dialyse- und Herz-Lungen-Maschinen oder Peristaltikpumpen (Infusion, Ernährung, Kontrastmittelapplikation) eingesetzt werden [8].

Kalorimetrische Sensoren sind für die Volumenstrommessung eingeführt und messen thermisch im Kanal eines Microchips Volumenströme von 50 nl/min – 100 ml/min [9]. Für Anwendungen in der Medizintechnik wurde kürzlich ein Sensor nach diesem Messprinzip eingeführt, der als Einwegprodukt konzipiert ist.

Aus den unterschiedlichen Drücken, die an zwei durch eine Drosselstrecke getrennte Messstellen eines durchströmten Schlauches auftreten, lassen sich wegen der Elastizität des Schlauches die unterschiedlichen Durchmesser bzw. die unterschiedlichen Kräfte in Radialrichtung bestimmen. Diese Kraftmessung wird z. T. in Fingerpumpen zur Volumenstrommessung eingesetzt. Ein Vorschlag, diese Änderung des Schlauchdurch-

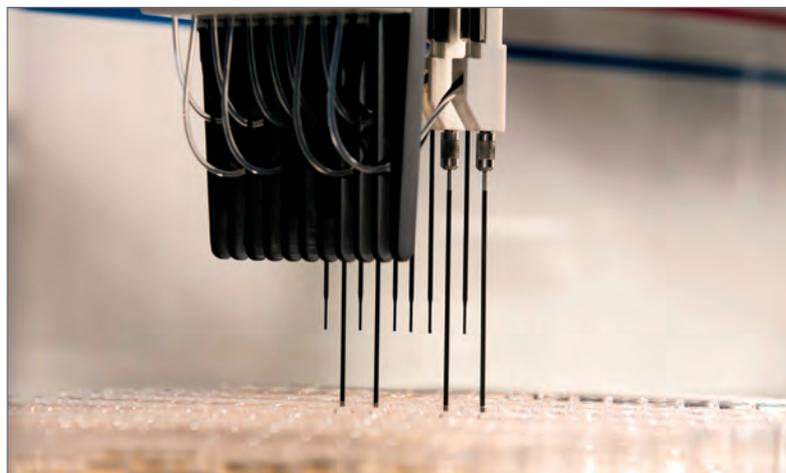


Bild 4:
Pipettieradeln in einem Laborautomat, der mehr als 200 Tests/h durchführen kann, wenn ein Pipettiervorgang pro Probe angenommen wird. Werden mit einzelnen Proben mehrere Tests durchgeführt, verringert sich der Durchsatz entsprechend (Bild: Fa. Euroimmun, Lübeck).

In vielen der genannten Geräte werden Volumenströme gemessen und auf der Basis dieser Messungen Vorgänge gesteuert und geregelt. Trotzdem handelt es sich nicht um sogenannte „Medizinprodukte mit Messfunktion“, die dadurch gekennzeichnet sind, dass

- eine quantitative Messung entweder eines physiologischen oder anatomischen Parameters oder der Menge der Energie bzw. von Substanzen, die dem Körper zugeführt oder entzogen werden sollen erfolgt,

messers kapazitiv zu messen, findet sich in [10]. Der Sensor besteht aus einem Einwegprodukt und einer Messelektronik. Das Einwegprodukt (Schlauchstück mit bekanntem Strömungswiderstand und bekannten Elastizitätseigenschaften der Wandung) bildet die Messzelle, die Messelektronik bleibt dauerhaft im Gebrauch (Bild 5).

Im Rahmen des Projektes „Metrology for Drug Delivery I“ (s. u.) wurde ein Prüfstand realisiert, der es ermöglicht, Volumenströme bis zu einer Größenordnung von 1 nl/min zu messen. Die Messung erfolgt durch Bestimmung der Position der Flüssigkeits-Luftgrenzschicht in einer Glaskapillare. Da in diesem Volumenstrombereich kein Vergleich mit anderen Messeinrichtungen möglich war, wurde der auftretende Gesamtfehler mit einer Abschätzung der Fehlereinflüsse der Zeitmessung und der Geometrie (u. a. Kapillare, Verdunstung, optisches System, Bildverarbeitungssoftware, Betriebssystem) bestimmt. Er betrug 5,5 % [11, 12].

Parallel-Infusion

Patienten auf Intensivstationen benötigen oft 20 oder mehr Medikamente, die per Infusion zugeführt werden. Andererseits können nicht so viele Zugänge gelegt werden. Daher werden häufig mehrere Pumpenausgänge in einer sogenannten Hahnbank zu einem Katheter zusammengeführt, der die Medikamente zum Patienten führt. Dies wird als Parallel-Infusion bezeichnet. Daraus resultiert eine Vielzahl möglicher Komplikationen. Auf Intensivstationen werden ca. 600 – 700 Han-



Bild 5: Einwegsensoren zur kapazitiven Durchflussmessung in Schläuchen. **Vorn:** Einwegsensoren mit beiden Messstellen und dazwischenliegender Drossel, **Rechts:** Referenzsensor, **Links:** Elektronik [10]

delspräparate verwendet [4]. Potenzielle Risiken bei Parallel-Infusionen können einerseits in den Medikamenten begründet sein (Verwechslungen wegen der hohen Komplexität, Inkompatibilitäten der Medikamente), was hier aber nicht betrachtet werden soll. Andererseits können Risiken auch im Infusionssystem und seinen Komponenten liegen (Fehl dosierung durch Toträume bzw. -zeiten, Elastizitäten, unterschiedliche Widerstände). Werden Änderungen des Volumenstroms eines Medikamentes vorgenommen, hat das Auswirkungen auf die Dosierung der anderen (Bild 6) [13]. Daher sollte z. B. das Totvolumen bzw. die Totzeit der Regelstrecke dadurch minimiert werden, dass die Zusammenführung der einzelnen Leitungen möglichst nah am Patienten erfolgt.

Ein Ansatz, Komplikationen zu vermeiden, die in der Vielzahl der Schläuche und der möglichen Inkompatibilität der Medikamente begründet sind, ist das sogenannte „drug-multiplexing“ (Bild 7).

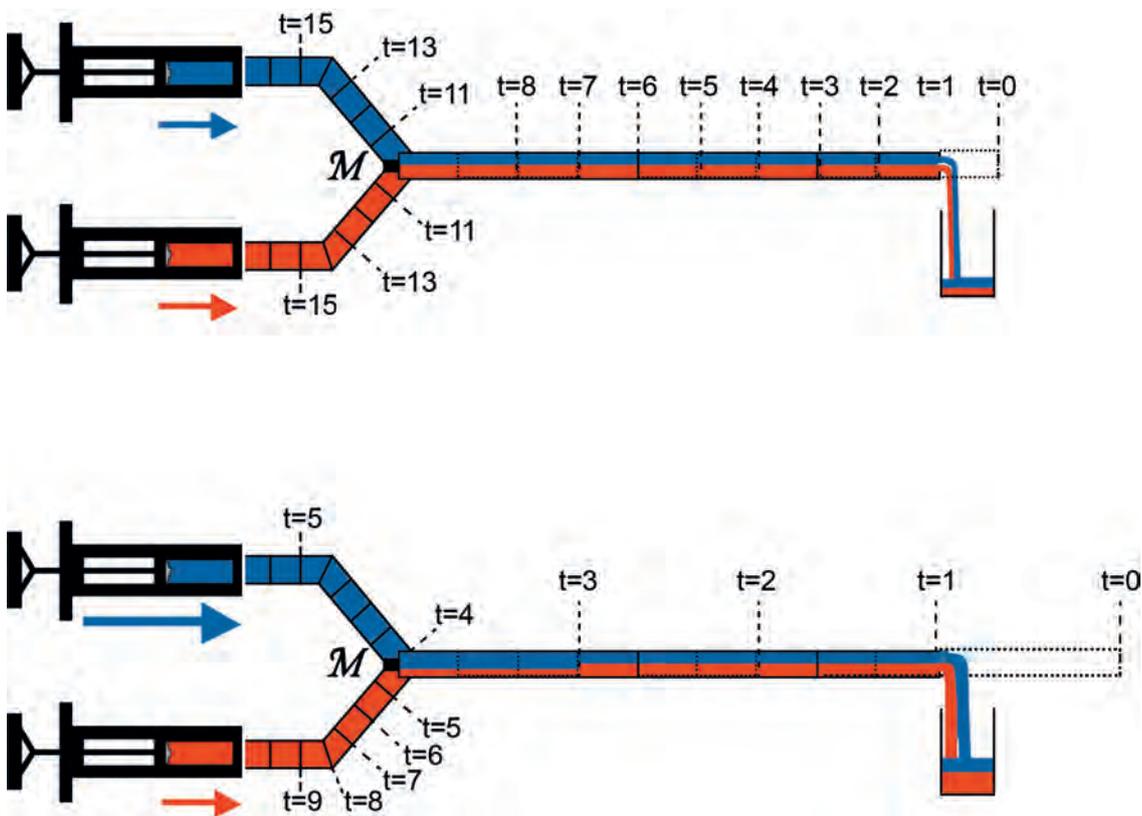
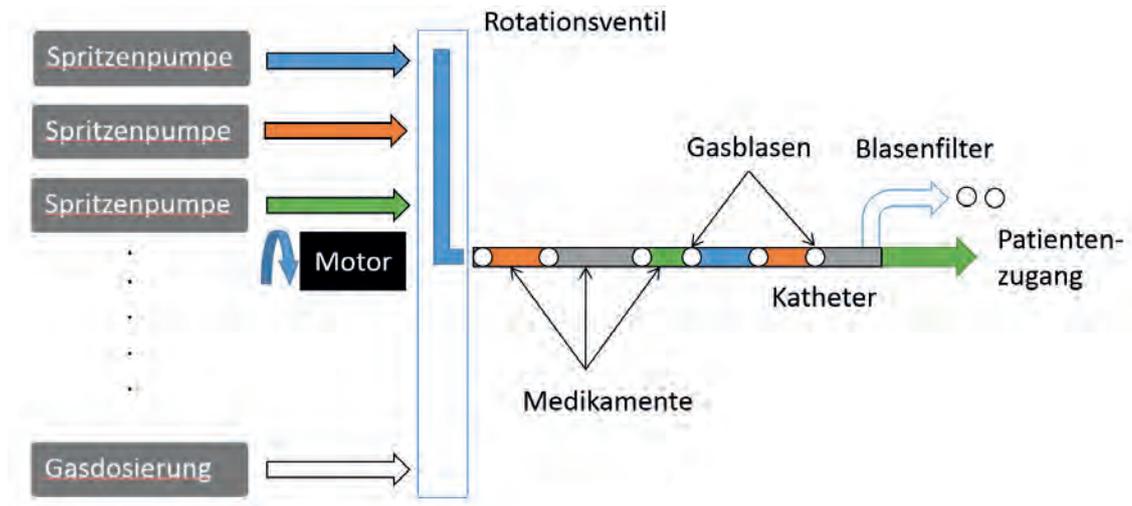


Bild 6: Parallelinfusion mit zwei Infusionspumpen (Prinzip). Eine in diesem Bild angenommene Erhöhung der Förder rate der oberen (blauen) Pumpe führt zu einer höheren Förder rate des sich im Katheter befindenden „roten“ Medikamentes, bis die Zusammensetzung am Ende die neue Volumenstromverteilung entspricht. Dies führt zu einer zusätzlichen Bolusgabe des roten Medikamentes [13].

Bild 7:
Drug-multiplexing
 (Prinzip) zur Vermeidung der Nachteile von parallelen Infusionen. Einzelne Medikamentengaben sind durch Gasblasen getrennt, die entweder durch einen Filter separiert werden oder sich im Blutkreislauf auflösen (CO₂) [14]



Dabei werden die Medikamente in einem Ventil in einzelnen „Pakete“ dosiert, durch einen Katheter gegeben und dabei durch z. B. CO₂-Gasblasen getrennt werden, die sich in der Blutbahn sehr schnell auflösen [14]. Mit diesem Konzept können mehrere der geschilderten Nachteile der Parallelinfusion vermindert werden.

EU-Projekt „Metrology for Drug Delivery“

Das europäische Projekt „Metrology for Drug Delivery I“ wurde im Rahmen der EURAMET-Ausschreibung „European Metrology Research Programme (EMRP)“ gefördert und führte während der Projektlaufzeit vom 1. Juni 2012 bis 31. Mai 2015 die nationalen Metrologieinstitute mehrerer europäischer Staaten (CH, CZ, DK, F, NL, PT, TUR) unter der Konsortialführerschaft der niederländischen VSL zusammen [15]. Zwei akademische Einrichtungen waren im Rahmen sogenannter REGs (*Researcher Excellence Grants*) beteiligt: das *Utrecht Medical Center* in den Niederlanden und die heutige Technische Hochschule Lübeck (damals: Fachhochschule Lübeck). Das Projekt diente der Entwicklung von Messinstrumenten und -verfahren zur Charakterisierung von Komponenten für die Medikamentenapplikation durch Infusion und der Verbesserung der metrologischen Infrastruktur in Europa. Es wurde eine Flowquelle realisiert sowie in mehreren Instituten kalibrierfähige Prüfstände aufgebaut und mit Vergleichsmessungen charakterisiert. Zahlreiche Ergebnisse wurden in einem Sonderheft der Zeitschrift *Biomedical Engineering* publiziert [16]. Weitere Ergebnisse des Projektes sind neben der Webseite zwei Dissertationen, zehn begutachtete Beiträge und über 20 Konferenzbeiträge. Der Abschlussbericht kann unter [17] heruntergeladen werden.

Die gravimetrische Messung von Volumenströmen ist der gegenwärtige Stand der Technik bei der Kalibrierung in den nationalen Metrologieinstituten, das Volumen wird auf eine Waage

gefördert und aus der Gewichtsänderung auf das Volumen geschlossen [18]. Dabei müssen mehrere mögliche Fehlerquellen betrachtet werden. Neben der Verdunstung an der Oberfläche sind u. a. auch der Übergang von der Kapillare in das Volumen im Messbecher (Tropfenübergang, Übergang durch ein Sinterbauteil, Eintauchen der Kapillare) sowie die mögliche Impulswirkung der strömenden Flüssigkeit hierbei von Belang. Bild 8 zeigt beispielhaft die Überprüfung eines *Coriolis-Flowsensors* im portugiesischen Metrologieinstitut „*Instituto Portugues da Qualidade – IPQ*“. Die Überprüfung wurde mit Reinstwasser und einer Waage (Empfindlichkeit 0,01 mg) mit einem abgedeckten Messbecher durchgeführt. Um Tropfenbildung zu vermeiden, taucht die Kapillare in die Flüssigkeit ein, Auftriebseffekte werden rechnerisch kompensiert. Das schweizerische Eidgenössische Institut für Metrologie – METAS verfügt über zwei Messstände, deren wesentliche Kennwerte in einem separaten Beitrag in diesem Heft vorgestellt werden [19]. Die beiden Prüfstände verfügen über Messbereiche von 50 nl/min bis 5 ml/min bzw. bis 400 ml/min, die mit einer Unsicherheit von 1,0 % bis 0,07 % bei konstantem Volumenstrom gemessen werden können.

Als Fortsetzung wird das Projekt „Metrology for Drug Delivery II“ – beginnend im Juni 2019 - in einem Zeitraum von drei Jahren unter der Projektleitung des IPQ von einem Konsortium bearbeitet, das sehr ähnlich wie im ersten Projekt zusammengesetzt ist. Neben nationalen europäischen Metrologieinstituten (CZ, CH, DK, F, GB, GR, S) ist auch das koreanische beteiligt. Außerdem sind weitere Einrichtungen wie das *Utrecht Medical Center* in den Niederlanden, das Forschungsinstitut INES-MN in Portugal, die Fa. Bronkhorst in den Niederlanden sowie in Deutschland die Hahn-Schickard-Gesellschaft und die Technische Hochschule Lübeck eingebunden.



Bild 8:
Gravimetrische
Prüfung eines
Coriolis-Volumen-
stromsensors.
Links: Präzisions-
pumpe,
Mitte: zu prüfender
Sensor,
Rechts: Waage
(Bild: *Instituto Por-
tugues da Qualidade*
– IPQ, Caparica,
Portugal).

Die wesentlichen Arbeitspakete umfassen

- die weitere Entwicklung der metrologischen Infrastruktur und der Kalibrationsprozesse für sehr kleine Volumenströme,
- die Entwicklung einer Mikropumpe als Flow-Quelle,
- die Weiterentwicklung der Infrastruktur zur Messung der dynamischen Viskosität Newtonscher Flüssigkeiten und
- die Entwicklung und Charakterisierung von Parallel-Infusionssystemen zur Verbesserung der Sicherheit bei Parallel-Infusionen.

Zusammenfassung

Die Messung kleiner Volumenströme in der Medizintechnik weist viele Gemeinsamkeiten mit Volumenstrommessungen in anderen Bereichen auf. Andererseits müssen Spezifika der Medizintechnik bedacht werden, die sich aus den speziellen Hygieneanforderungen ergeben. Die Dosierung und Messung kleiner Volumenströme in der Medizintechnik ist Thema eines jährlich in Lübeck stattfindenden Workshops [20].

Danksagung

Der Autor dankt Saif Abdul-Karim, Christian Damiani, Bodo Nestler und Jörg Schroeter für die langjährige gute Zusammenarbeit im Bereich der Messung und Handhabung kleiner Volumenströme.

Literatur

- [1] EU-Verordnung 2017/745 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. April 2017 über Medizinprodukte: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017R0745&from=DE>, Zugriff: 4.1.2018
- [2] Klein, St., Kraft, M. u. a.: *Biomedizinische Technik*. In: Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau. 25. Aufl. 2018, Berlin, Springer
- [3] Bundesamt für Arzneimittel und Medizinprodukte – BfArM: https://www.bfarm.de/SharedDocs/Downloads/DE/Service/Statistik/MP-Statistik/statist-Auswert_Anzahl-Risikomel-Produktgr.jpg?__blob=poster&v=5, Zugriff: 6.1.2019
- [4] v. Hintzenstern, U.: *i.v. – Infusion – Transfusion – Parenterale Ernährung*. 3. Auflage. München, Elsevier, 2004
- [5] EU-Verordnung 2017/746 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. April 2017 über In-vitro-Diagnostika und zur Aufhebung der Richtlinie 98/79/EG und des Beschlusses 2010/227/EU der Kommission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017R0746&from=DE>, Zugriff 5.1.2018

- [6] *Verordnung über das Errichten, Betreiben und Anwenden von Medizinprodukten* (Medizinprodukte-Betreiberverordnung - MPBetreibV), https://www.gesetze-im-internet.de/mpbetreibv/anlage_2.html, Zugriff: 6.1.2019
- [7] Mieke, St., Schade, Th.: *Leitfaden zu messtechnischen Kontrollen von Medizinprodukten mit Messfunktion*. Ausgabe 3.0, Dez. 2016, Braunschweig, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Medizinische Messtechnik MM 11
- [8] Fa. Sonotec, Halle. <https://www.sonotec.de/produkte/nicht-invasive-fluessigkeitsueberwachung/durchflussmessung/sonoflow-clamp-on-sensor/>, Zugriff: 7.1.2019
- [9] Fa. Sensirion, Staefa/CH. https://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/4_Liquid_Flow_Meters/Sensirion_Liquid_Flow_Meters_Product_Brochure.pdf. Zugriff: 19.1.2019
- [10] Kartmann, S., Koch, F., Zengerle, R., Koltay, P., Ernst, A.: *Single-use flow sensor based on the differential pressure principle employing the radial expansion of a low-cost silicone tube*. 19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS), Kaohsiung, 2017, 998-1001
- [11] Ahrens, M., Klein, St., Nestler, B., Damiani, Chr.: *Design and uncertainty assessment of a setup for calibration of microfluidic devices down to 5 nL min⁻¹*. Measurement Science and Technology, 25 (2014) 015301 (9pp), doi:10.1088/0957-0233/25/1/015301
- [12] Ahrens, M.: *Messung von zeitlich veränderlichen Volumenströmen im Bereich von 5 – 500 nl/min*. Dissertation Universität zu Lübeck, 2015
- [13] Snijder, R.: *Physical causes of dosing errors in patients receiving multi-infusion therapy*. Dissertation. Universiteit Utrecht/NL, 2016
- [14] Abdul-Karim, S., Schroeter, J., Nestler, B.: *Development and Evaluation of a Drug Multiplexing Infusion System*. Biomed Tech 2014. 59 (s1). Walter de Gruyter Berlin. DOI 10.1515/bmt-2014-5011
- [15] <http://www.drugmetrology.com/>, Zugriff 2.12.2018
- [16] Klein, St., Lucas, P. (Hrsg.): *Biomedical Engineering. Special Issue: Low Liquid Flows in Medical Technology*. Volume 60, Issue 4 (Aug 2015) <https://www.degruyter.com/view/j/bmte.2015.60.issue-4/issue-files/bmte.2015.60.issue-4.xml>, Zugriff 27.12.2018
- [17] https://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/?eurametCtcp_project_show%5Bproject%5D=1133&eurametCtcp_project%5Bback%5D=471&cHash=c97258c35f32e70c13ae1d6ccac4e1b1, Zugriff; 15.1.2019
- [18] Bissig, H., Petter, H., Lucas, P., Batista, E. u. a.: *Primary standards for measuring flow rates from 100 nl/min to 1 ml/min – gravimetric principle*. Biomed. Eng.-Biomed. Tech. 2015; 60(4): 301–316
- [19] Bissig, H., Tschannen, M., de Huu, M.: *Lowest traceable flow rates in micro fluidics and new measurement possibilities for response time characterization*. PTB-Mitteilungen 2019, diese Ausgabe
- [20] <https://www.th-luebeck.de/msgt/aktuelles/workshops/mikrofluidik-workshops/2018/>, Zugriff: 10.1.2019

Lowest traceable flow rates in micro fluidics and new measurement possibilities for response time characterization

Hugo Bissig¹, Martin Tschannen², Marc de Huu³

Abstract

Flow calibrations are important in several areas of pharmaceutical, flow chemistry and health care applications where volumetric dosage or delivery at given flow rates are crucial for the process. Not only a calibrated steady flow rate is important, but also a changing flow rate should be measured accurately as the final delivered volume will depend on these accurate flow measurements. Therefore, the Microflow and Milliflow facilities at METAS have been updated to cover these requirements from the microfluidic industry. So far, calibrations for steady flow rates and pulsating flow in the range from 100 nl/min up to 400 ml/min with uncertainties from 0.7 % to 0.07 % respective from 3 % to 0.2 % can be realized. As the METAS flow generators are homemade syringe pumps with linear measuring systems to determine the position of the plunger of the syringe, any fast flow rate change can be measured by the change of the moving speed of the plunger. Therefore, fast changing flow rates within 1 s can be produced and either detected by means of the traceable dynamic gravimetric method or determined from the converted speed from the linear measuring system into flow rate. This allows determining the response time of any flow meter or flow generator for fast changing flow rates. Moreover, the METAS syringe pump allows generating flow rates even lower than 100 nl/min. The measurement uncertainty of the fast changing flow rate measurement is still under investigations.

The design of the updated METAS Milliflow and Microflow facilities will be discussed as well as contributions of the installation on the response time of the dynamic gravimetric method. The characterization of these contributions is important in order to assess correctly response times of flow meters or flow generators under test. Thus, calibrations for steady flow rate, fast changing flow rates and response times of either flow meters or flow generators can be performed with the METAS Milliflow and Microflow facilities.

1. Introduction

Calibration of flow devices are important in several areas of pharmaceutical, flow chemistry and health care applications where volumetric dosage or delivery at given flow rates are crucial for the process. Although most of the flow devices are measuring flow rates of process oriented liquids, their calibrations are often performed with water as calibration liquid. It is recommended to perform the calibrations of the flow devices with process oriented liquids as the liquid itself might influence the performance of the flow devices. Additionally, in the dosing process the start and stop of the measurement are related to the build-up of flow and the stop of flow. Therefore it is important to determine the response time characterization of the flow meter in the case of fast changing flow rates.

After developing a facility for the micro-flow range [1, 2], METAS has developed facilities with METAS flow generators to address the issue of measuring with process oriented liquids and fast changing flow rates (see Figure 1). The METAS flow generators are homemade syringe pumps which allow measurements with liquids other than water in the range from 400 ml/min down to 50 nl/min [3, 4]. Traceability is guaranteed through the calibration of the generated flow

¹ Dr. Hugo Bissig, Federal Institute of Metrology (METAS), E-Mail: hugo.bissig@metas.ch

² Martin Tschannen, Federal Institute of Metrology (METAS), E-Mail: martin.tschannen@metas.ch

³ Dr. Marc de Huu, Federal Institute of Metrology (METAS), E-Mail: marc.dehuu@metas.ch

Figure 1: The METAS Milliflow (left) and Microflow (right) facilities



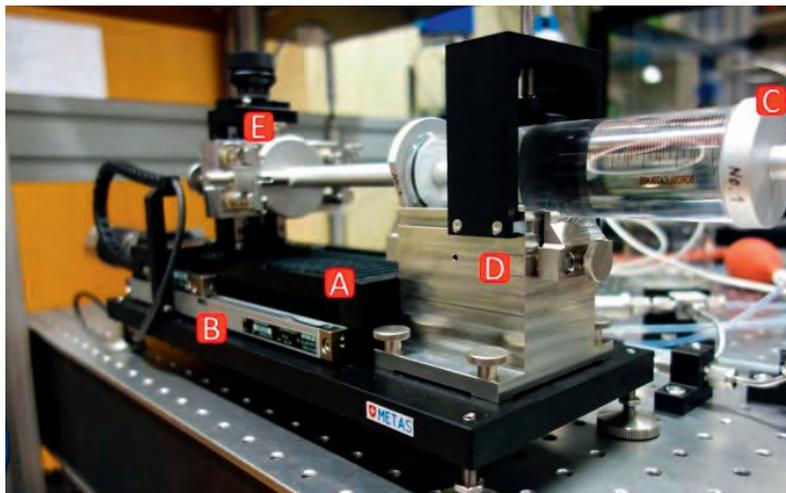
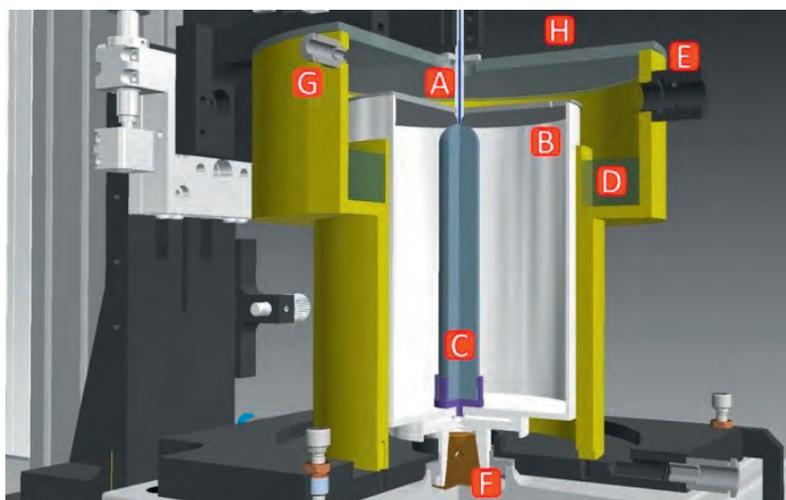


Figure 2:
METAS syringe pump,
(A) high precision linear stage,
(B) linear measuring system,
(C) syringe,
(D) mounting syringe body,
(E) mounting and positioning for syringe plunger

rates of the METAS syringe pumps by means of the dynamic gravimetric method where a liquid of well-known density and a well-controlled evaporation rate is used. As the METAS syringe pump is a volumetric flow generator, it can be operated with any liquid acting as a transfer standard to perform calibrations of flow devices. The advantage of traceable calibrations of a flow device with the process oriented liquid is to enhance the quality of the measurements results of the flow device during the production process. Different types of flow devices are stated from the manufacturer with accuracies between 0.5 % and 10 % depending of the flow rate range and the working principle of the flow devices. Obviously, a traceable calibration with uncertainties ranging from 0.07 % to 0.9 % for steady flow rates ranging from 400 ml/min to 50 nl/min will enhance the accuracy of the measurements as the stated deviations of the flow devices are corrected in the application and the measurement uncertainties are known and much smaller than the accuracies stated by the manufacturer. Additionally, characterization of the response time of fast changing flow rates within 1 second will enhance the accuracy of the measurements as the behaviour of the flow meter under changing flow conditions will be known and can be applied to any dosing application.

Figure 3:
Weighing zone on the balance.
(A) outlet needle,
(B) beaker with cover,
(C) glass filter,
(D) water in evaporation trap,
(E) mount for *T* and *rH* sensor,
(F) balance,
(G) tubing for humidity exchanger.



2. METAS flow generator

The METAS flow generator consists of a high precision linear stage with a fixed linear measuring system, mounting parts to fix syringes in front of the table and mounting parts to fix and move the plunger of the syringe in order to generate the flow rate (see Figure 2), [3]. The position of the linear stage is determined by counting the pulses sent by the linear measuring system by means of an FPGA, which is a Field Programmable Gate Array with hard coded program code running on a defined constant cycle time of the order of 25 ns (40 MHz). For each additional pulse in any direction, a time stamp of the FPGA is recorded and a pair with the position and the timestamp is formed. This pair of values is then read from the main software and the real time position can be recorded. The real time speed is then determined by a linear fit of the position as a function of time. Multiplying the speed with the cross section of the syringe gives the volume flow rate.

3. Continuous water bridge to collect the water

A special measurement beaker has been built, as shown in the detailed cross-section in Figure 3 (B), [3]. The outlet needle is in general positioned 200 μm to 50 μm above the glass filter (Figure 3, C) depending on the diameter of the outlet needle (1 mm to 0.3 mm). At low flow rates, the water enters the measurement beaker and the capillary force in the glass filters sucks the water in before any droplet can be formed at the surface. The water finds its way through the glass filter and continues in the bulk of water at the bottom of the beaker. If the flow rate is higher, the water jet hits the surface of the glass filter and the water flows down at the surface of the glass filter. In both cases the forces due to the water bridge are constant in time for steady flow rates and they do not influence their measurement. The housing around the beaker leads to a stable evaporation rate of several nl/min for water which hardly contributes to the uncertainty [3] and does not influence the measurements of fast changing flow rates.

4. Changing flow rates and instantaneous flow rate determination

Similar to the determination of the steady flow rate the collected weighing data and the data of the linear measuring system are fitted by means of a least square linear fit to obtain the instantaneous flow rate [1, 3]. In this case we have recorded the pair with the position and the timestamp of the linear measuring system using the FPGA to collect each single pulse. The weighing data are continu-

ously collected by a Real Time system (RT), which communicates with the balance at 20 Hz and pairs the weight value directly with the time stamp of the RT. The increase of the weight values and the position of the linear measuring system are shown in Figure 4. Therefore, we are able to choose a fixed time window as short as 0.5 s to perform the least square linear fit to determine the flow rates of the syringe pump and the dynamic gravimetric method. By increasing the starting time of the fixed time window by each time step the instantaneous mass flow rates can be determined continuously in time as shown in Figure 5. The vertical orange and cyan lines indicate two fixed time windows of 0.5 s at 100 s resp. 200 s in Figure 4 and the resulting flow rate in Figure 5. Additionally, the signal of the DUT is recorded at a frequency of 25 Hz and the averaged mass flow rate over 0.5 s of the DUT is also shown in Figure 5. At first sight, all 3 data curves collapse on a single curve.

The same features of the changing flow rates can be observed for the measured water pressures at different locations along the piping as shown in Figure 6. The current facility does only collect the pressure values at a rate of 1 Hz and does not yet allow assigning the pressure changes in the piping at different positions to the actual change of the flow rate in that specific position. A read out frequency at 20 Hz is needed and will be implemented in the future.

5. Delay of the changing flow rates along the piping

On closer inspection of the data in Figure 5 we see a delay in the increase of the flow rate for the DUT and for the dynamic gravimetric method. To show the repeatability of this feature we shifted the time axis of three different measurements to get a collapse of the increase in flow rate at the syringe pump at time 0 s (see Figure 7). These measurements have been performed with the original setup of the facility and stainless steel tubing. Only a short piece of PFA-tubing of a length of 20 mm has been used at the outlet of the syringe. The PFA-tubing withstands a pressure of 19 bar and therefore no significant deformation at a pressure below 1 bar is expected. These delays in the increase of the flow rate are probably partially due to the buildup of the pressure along the piping which is related to the actual flow rate at a specific position. On the other hand, there is a delay of the DUT due to the measurement averaging time of the flow meter and a delay for the gravimetric method due to the balance response. To investigate this behavior, measurements with stainless steel tubing and without sensors have been performed to get an idea of their influence on the delays at the DUT and at the balance. The data and the

repeatability are shown in Figure 8. We clearly see that the delay of the response of the DUT and the balance are shorter than for the case shown in Figure 7. To compare the change in the delay a measurement of each setup of the facility are shown in Figure 9. The response times of the DUT and the

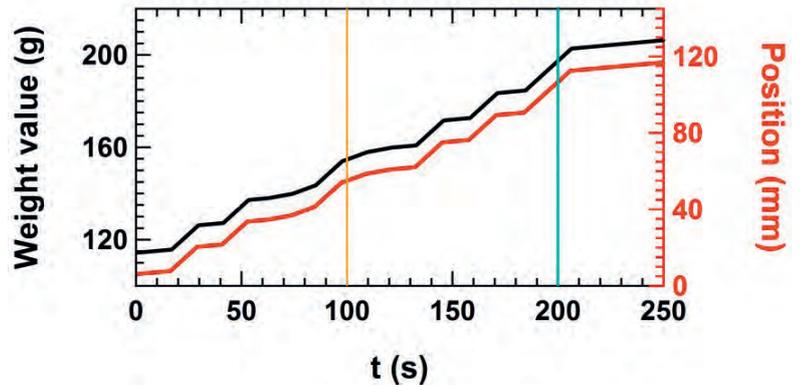


Figure 4: Increase of mass on the balance (black line) and increase of the position of the linear measuring system (red line) as a function of time. The vertical orange and cyan lines indicate two fixed time windows of 0.5 s at 100 s resp. 200 s.

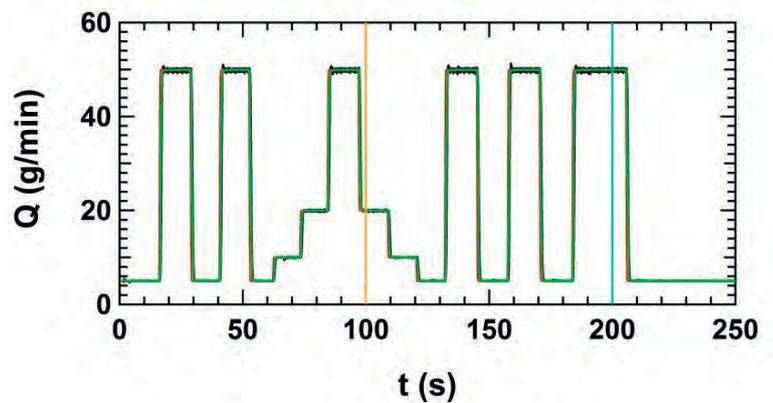


Figure 5: The determined mass flow rate of the balance (black line), the syringe pump (red line) and the DUT (green line) as a function of time. The vertical orange and cyan lines indicate two fixed time windows of 0.5 s at 100 s resp. 200 s.

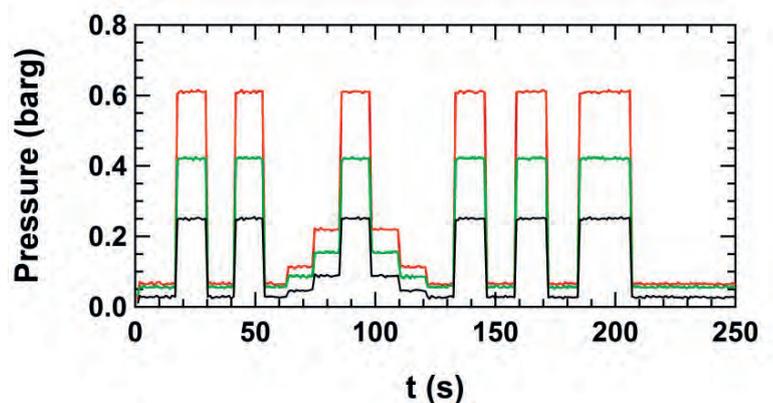


Figure 6: The pressure in the piping at three different positions: just after the syringe pump (red line), upstream DUT (green line) and downstream DUT (black line).

dynamic gravimetric system are faster in the case of shorter piping without implemented temperature and pressure sensors.

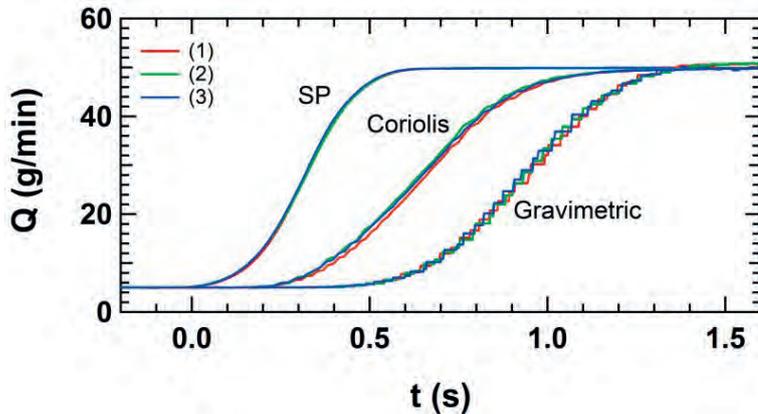


Figure 7: Original setup: repeatability of the delay in the increase of the flow rate for the DUT and for the dynamic gravimetric method. Three measurements are shown.

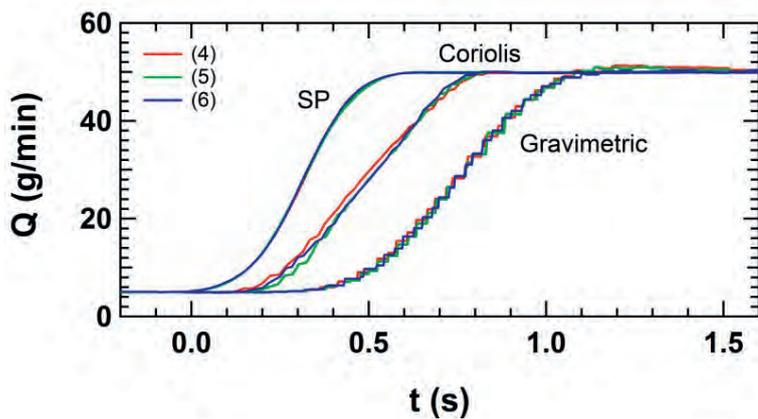


Figure 8: Only tubing, no sensors: repeatability of the delay in the increase of the flow rate for the DUT and for the dynamic gravimetric method. Three measurements are shown.

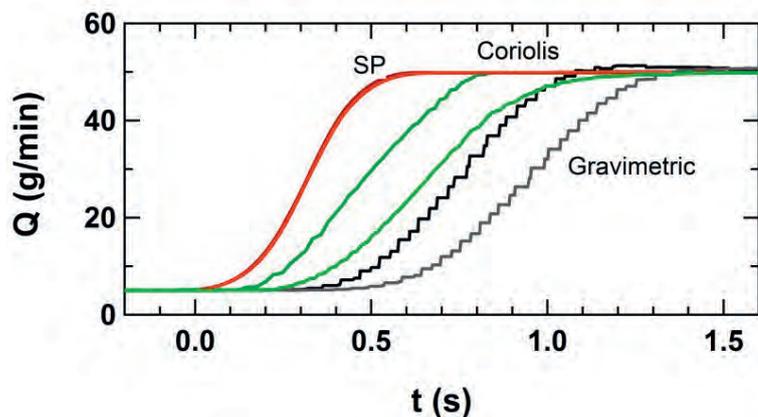


Figure 9: Comparing the delays in the original setup of the facility (SP red line, DUT light green line, Balance gray line) or only stainless steel tubing without sensors (SP dark red line, DUT dark green line, Balance black line).

6. Response time characterization and target uncertainties

Further investigations are planned to determine the delay in response time due to the different components of the facility. One possibility is to add several pressure sensors along the piping and to evaluate the actual delay due to the components in place. This would allow attributing the effective delays due to the DUT, the flow generator as well as the effective delay of the dynamic gravimetric system. All these contributions of the facility have to be determined in order to avoid any systematic error in response time characterization.

The target uncertainties are set to 3 % to 0.2 % for fast changing flow in the range from 100 nl/min up to 400 ml/min. Further investigations are currently performed to evaluate the influence of the capillary forces between the outlet needle and the glass filter due to the strong and fast flow rate changes. Initially, the capillary forces are assumed to be constant for steady flow rate, but this will not be the case for the strong and fast flow rate changes. These contributions have to be quantified and added to the overall measurement uncertainty.

Conclusion

To address the issue of measuring with process oriented liquids and fast changing flow rates METAS has developed a facility with METAS flow generators, which are homemade syringe pumps allowing measurements with liquids other than water in the range from 400 ml/min down to 50 nl/min. Fast changing flow rates within one second are possible in this flow rate range. Further investigations are performed to confirm the target uncertainties from 0.2 % to 3.0 % in this range for fast changing flow.

References

- [1] H. Bissig, M. Tschannen and M. de Huu, *Micro-flow facility for traceability in steady and pulsating flow*, Flow Meas. and Instrum. 2015, vol. 44, 34–42.
- [2] H. Bissig, H.T. Petter, P. Lucas et al., *Primary standards for measuring flow rates from 100 nl/min to 1 ml/min – gravimetric principle*, Biomed Eng – Biomed Tech 2015, vol. 60 (4), 301–316.
- [3] H. Bissig, M. Tschannen and M. de Huu, *Recent Innovations in the field of traceable calibration of liquid milli-flow rates with liquids other than water*, Flomeko 2016, proceedings paper.
- [4] H. Bissig, M. Tschannen and M. de Huu, *Improving process quality by means of accurate and traceable calibration of flow devices with process oriented liquids*, CHIMIA 72 (2018), 124–129.

Realitätsnahe Prüfung von Wasserzählern

Daniel Schumann*

Wachsendes Verbrauchs- und Umweltbewusstsein sowie die Novellierung gesetzlicher Vorgaben führen zu steigenden und neuen Anforderungen an die Durchflussmesstechnik, sowohl in Richtung größerer Durchflussbereiche und kleinerer Messunsicherheiten als auch im Hinblick auf die Validierung der bisherigen Prüfbedingungen der Geräte an die realen Messbedingungen beim späteren Betrieb. Am Beispiel eines herkömmlichen Wasserzählers lässt sich dieser Trend gut verdeutlichen. Die neuen gesetzlichen Regelungen erlauben beispielsweise das Inverkehrbringen von Hauswasserzählern mit einem Messbereich von 1:1000 (bisher üblicherweise zwischen 1:40 und 1:160), ohne an den Prüfprozeduren etwas zu ändern. Prüfung und Nacheichung der Messgeräte nach der festgelegten Eichfrist gemäß MessEV von 6 Jahren für Kaltwasserzähler [§34 Mess- und Eichverordnung (MessEV)], erfolgen für jedes Messgerät bei festgelegten hoch-konstanten und reproduzierbaren Prüfbedingungen. Mit diesen soll das Messverhalten der Geräte geprüft werden, um sicherzustellen, dass nach technisch-wissenschaftlichen Erkenntnissen diese die innerhalb der Eichfrist zulässigen Verkehrsfehlergrenzen nicht überschreiten. Die in der Realität gegebenen Bedingungen, ganz besonders die realen Entnahme- bzw. Verbrauchsprofile (s. Bild 1) unterscheiden sich jedoch grundlegend

von konstanten Durchflüssen. Der tageszeitliche Verbrauch bzw. das Verbrauchsprofil ist maßgeblich gekennzeichnet von kurzzeitigen Entnahmen, Überlagerungen, unterschiedlichen Flankenanstiegen, Kleinstverbräuchen und Stillständen.

Diese Diversität macht es anspruchsvoll, Prüfprozeduren für Wasserzähler mit repräsentativen realitätsnahen Lasten aufzusetzen. Die Ergebnisse des Forschungsprojekts des DVGW „Aktualisierung der Verbrauchsganglinien für Haushalte, öffentliche Gebäude und Kleingewerbe sowie Entwicklung eines Modells zur Simulation des Wasserbedarfs“ liefern die Grundlage für die Identifizierung von realitätsnahen Durchflussänderungen innerhalb von Wohngebäuden.

Auf Grundlage dieser Daten wurde ein Algorithmus entwickelt, welcher stochastisch gesichert Durchflussprofile für die realitätsnahe Prüfung von Wasserzählern generiert. Der Algorithmus basiert dabei auf der Wahrscheinlichkeitsdichte der Durchflussereignisse mit der kumulativen Wahrscheinlichkeitsfunktion als zentralem Konzept. Daraus wurde ein Vertrauensband erstellt, welches alle betrachteten Datensätze beinhaltet und von dem mittels Inversionsmethode, stochastisch gesicherte, standardisierte Prüfprofile erzeugt werden können. Dem Algorithmus können weitere Parameter hinzugefügt werden,

* Daniel Schumann, Arbeitsgemeinschaft „Weitergabe Flüssigkeitsmenge“, PTB Braunschweig, E-Mail: daniel.schumann@ptb.de

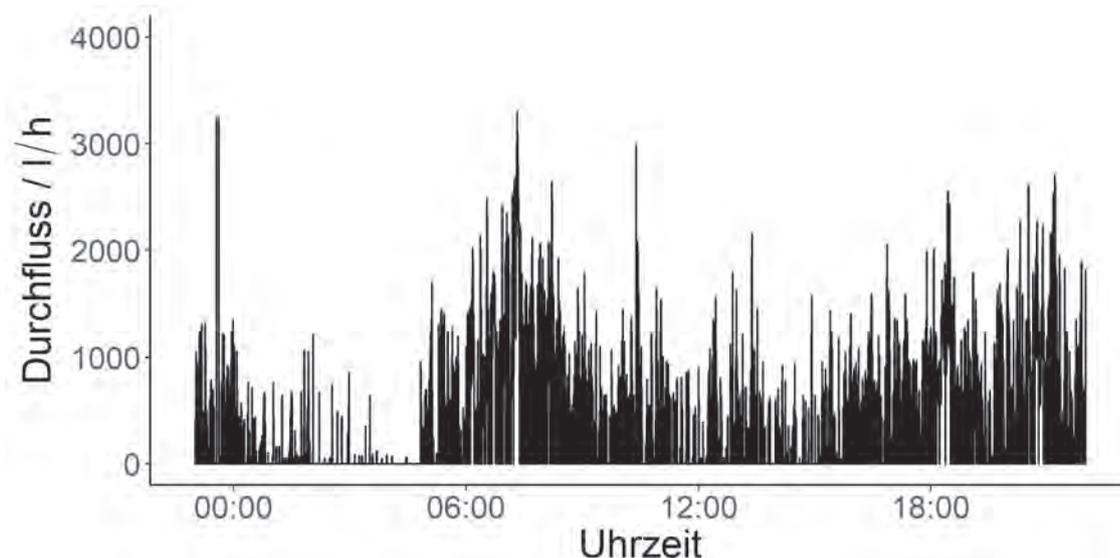


Bild 1: Reales Wasserverbrauchsprofil eines Mehrfamilienhaushaltes in Deutschland

wie beispielsweise eine definierte Flüssigkeitsmenge oder eine definierte Versuchszeit.

Dadurch, dass die verwendeten Daten lediglich in Deutschland erhoben wurden, sind die mit dem Algorithmus generierten Profile nur für Deutschland repräsentativ. Allerdings werden im Rahmen des europäischen EMPIR-Forschungsprojektes „*Metrology for real-world domestic water metering*“, kurz „MetroWaMet“ Daten auch auf europäischer Ebene erhoben. Erste Datenreihen der europäischen Partner weisen eine Übereinstimmung mit den vom DVGW erhobenen Daten auf, d. h. die Profile sind voraussichtlich auch auf weitere mitteleuropäische Länder übertragbar.

Wenn die erforderliche Prüfstandsinfrastruktur fertiggestellt ist, wird es möglich sein, Wasserzähler unter realitätsnahen Bedingungen zu prüfen.

Industrie 4.0 in der Produktion von Wohnungswasserzählern

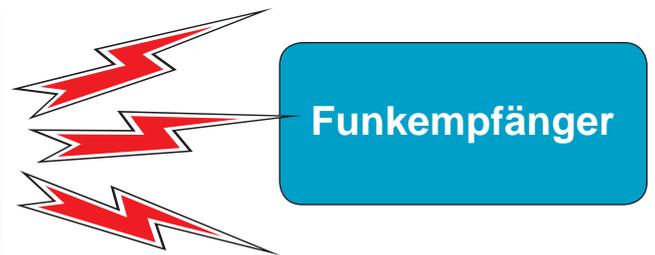
Dietmar Grimm*

Moderne Wohnungswasserzähler zur Ermittlung von Kalt- und Warmwassermengen für die Nebenkostenabrechnung sind mit integrierten Funksendern ausgestattet. Dies bietet den Vorteil, dass der Betreiber der Wasserzähler die Messwerte auf digitalem Weg über seinen Empfänger übermittelt bekommt. Gegenüber dem heute noch weit verbreiteten händischen Ablesen werden so Ablesefehler vermieden, es ist kein Wohnungszutritt notwendig, und es können auf diesem Weg auch zusätzliche Verbrauchs- oder Betriebsdaten erfasst und übermittelt werden.

länge als auch alle gängigen Messkapselzähler sind auf diesem Weg umsetzbar. Bedingung dafür ist, dass alle Hydrauliken eine gemeinsame geometrische Schnittstelle zum Zählwerk hin aufweisen. Kundenspezifische elektronische Eigenschaften werden durch Hardware- oder Softwarevarianten des Zählwerks realisiert. Beide Teile werden durch eine durchsichtige, nicht zerstörungsfrei abnehmbare Haube verbunden.

Die Produktion besteht aus zwei prinzipiellen Abschnitten (s. Bild 1): der Montage des Zählwerks und der anschließenden Komplet-

* Dr.-Ing. Dietmar Grimm, Lorenz GmbH & Co. KG, E-Mail: dietmar.grimm@lorenz-meters.de



Die Funk-Wohnungswasserzähler der Fa. Lorenz¹ sind als Flügelradzähler mit induktiver Flügelradabtastung mit adaptiver Abtastfrequenzregelung konzipiert. Sie beinhalten eine elektronische Fehlerkurvenkorrektur mit abschnittswisen Kalibrierwerten. Es sind Algorithmen für die Leckage- und Manipulationserkennung integriert. Eine digitale Anzeige (LCD) informiert den Endverbraucher über den aktuellen Zählerstand und weitere Werte. Die integrierte IR-Schnittstelle dient zur kundenspezifischen Konfiguration beispielsweise von Stichtags- und Funkparametern oder zum Auslesen detaillierter Betriebs- und Verbrauchsdaten.

Dem Aufbau der Funk-Wohnungswasserzähler liegt ein Plattformkonzept zugrunde: unterschiedliche Hydrauliken können mit unterschiedlichen Zählwerken kombiniert werden, um die ganze Vielfalt benötigter Kombinationen abzubilden. Sowohl Aufputzzähler von 80 mm – 130 mm Bau-

teilung mit einer Hydraulik zum Wasserzähler. Nach der initialen Programmierung der Elektronikplatine erfolgt die mechanische Montage aller Zählwerkseinzelteile. Das fertige Zählwerk wird im Rahmen des Qualitätssicherungssystems einer Funktionsprüfung unterzogen.

Die Fertigung des Wasserzählers beginnt mit dem Aufbringen der Beschriftung auf dem Zählwerk entsprechend den rechtlichen Vorgaben und den Kundenvorgaben. Diese zählerindividuelle Kennzeichnung ist nach der Paarung von Zählwerk und Hydraulik unzerstörbar unter der Haube angebracht. Anschließend werden die elektronische Justage der Fehlerkurvenkorrektur und die messtechnische Prüfung, die der Konformitätsbewertung des Wasserzählers zugrunde liegt, durchgeführt. Abschließend erfolgen die kundenspezifische Konfiguration und die Verpackung des Produkts.

Durch das beschriebene Plattformkonzept

¹ Die Erwähnung von kommerziellen Produkten oder Herstellern in Text- oder Bildform geschieht nur zu Informationszwecken und bedeutet in keiner Weise eine Empfehlung der PTB für das Produkt

und verschiedene Kundenwünsche entsteht eine Variantenvielfalt, die nur durch eine moderne Produktionsanlage zu bewältigen ist, die folgende notwendige Fähigkeiten beinhaltet:

- vernetzte IT-Systeme für Auftragssteuerung und Prozesskontrolle;
- umfassende Erfassung der Prozessdaten;
- Absicherung sowohl manueller als auch automatisierter Prozessschritte durch IT-Systeme;
- Variantensteuerung;
- effiziente Einzel- und Massenproduktion (Stückzahl 1 bis N).

Für Aufbau und Betrieb der hochgradig angepassten Produktionsanlage wurde mit mehreren Partnern im industriellen Bereich (Fa. ITQ, Fa. Software Factory, Fa. Rombach Automation)¹ und der Hochschule Aalen zusammengearbeitet. Gemeinsam wurde ein umfassendes Produktionssystem geschaffen, das durch seine Eigenschaften und durch die Auszeichnung „100 Orte – Industrie 4.0“ durch die „ALLIANZ Industrie 4.0“ in Baden-Württemberg als herausragendes Beispiel für Industrie 4.0 bezeichnet werden darf.

In dieses Konzept passen die Doppelkolbenprüfstände der Fa. Rombach Automation, die für die eichrechtlich relevanten Prozessschritte der Justage und Konformitätsprüfung eingesetzt werden. Diese sind als Reihenprüfstand mit vier Prüflingen

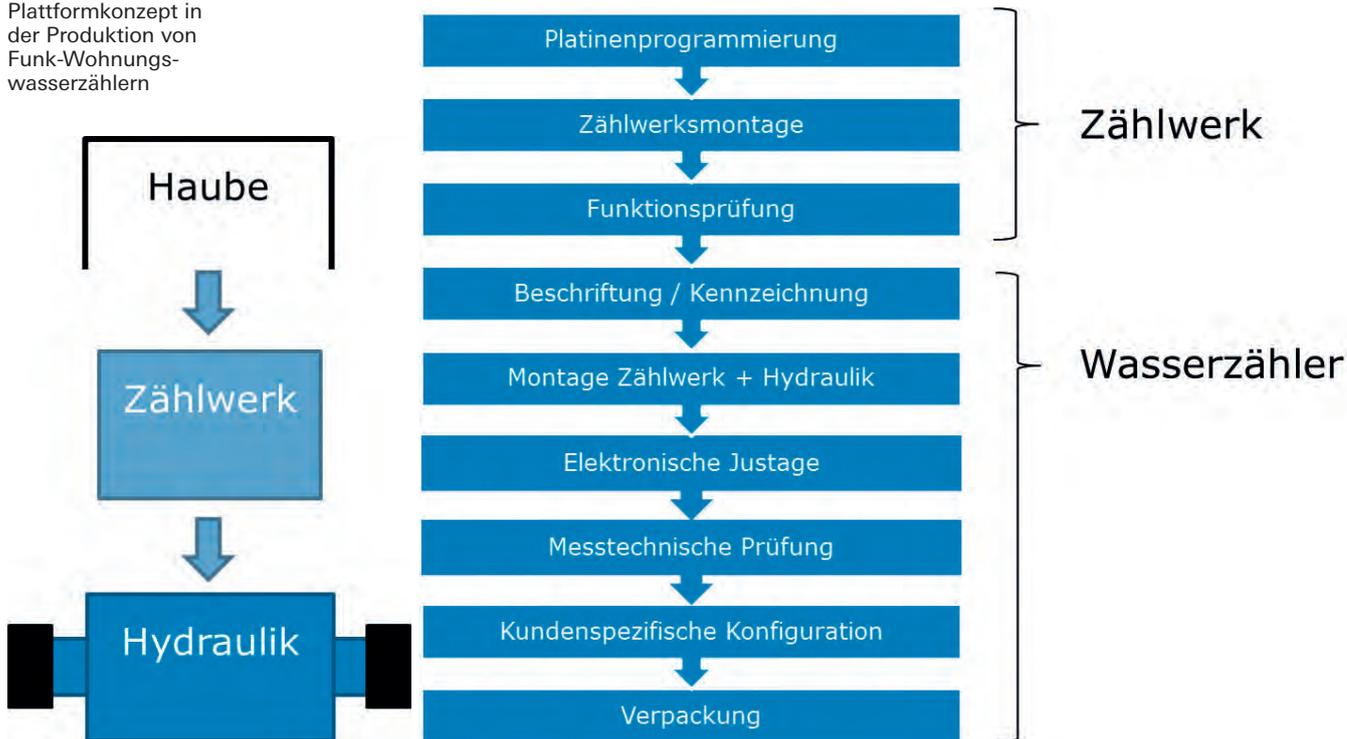
aufgebaut, in denen ohne Umbau wechselnde Wasserzählertypen geprüft werden können. An den Prüfständen werden die individuellen Korrekturfaktoren für die Fehlerkurvenkorrektur ermittelt. Die abschließende Konformitätsprüfung wird an allen Wasserzählern durchgeführt (100-Prozent-Prüfung). Die Prüfstände passen zum oben beschriebenen Produktionskonzept und wurden daher für diese Anlage ausgewählt.

Neben den bereits oben beschriebenen Fähigkeiten spielen für die Fa. Lorenz noch weitere, über übliche Industrie 4.0-Anwendungen hinausgehende, Punkte eine wichtige Rolle:

- flexible Aus- und Einbringung von Teilen in und aus der Produktion zum Zweck der Ausschussreduzierung, Ressourcenschonung und Wiederverwertung;
- Verarbeitung unterschiedlicher Produkte mit gleichem Produktionsequipment ohne Umrüstung;
- Sinnvolle Automatisierung in Kombination mit manuellen Tätigkeiten.

Diese Ergänzungen tragen zu Umweltschutz und Standortsicherung in Deutschland bei und sind als Gegenkonzept zu Produktionsverlagerung in Billiglohnländer zu verstehen.

Bild 1:
Plattformkonzept in der Produktion von Funk-Wohnungswasserzählern



Wasserzählerprüfung im Industrie-4.0-Umfeld

Alexander Rombach¹, Timo Kienzler²

Industrie 4.0 bedeutet bei der Konformitätsuntersuchung von Wasserzählern den Einsatz hochflexibler Prüftechnik zur Produktion individueller Produkte mit Auftragsgrößen von 1 zu N.

Das hohe Lohnniveau und die geringen Preisvorstellungen stellen eine große Herausforderung für den Produktionsstandort Deutschland dar. Billige Produkte sind in Deutschland nicht mehr herstellbar, preiswerte Produkte dagegen schon.

Der Wert eines Wasserzählers bestimmt sich neben einem anstandslosen Messverhalten auch durch eine kurzfristige Verfügbarkeit verschiedener Wasserzählerformate in beliebigen Stückzahlen. Durch die Kommunikationsmöglichkeiten elektronischer Wasserzähler steigt die Variantenvielfalt deutlich an.

Der Anspruch an die Messtechnik veränderte sich durch Einführung der Measuring Instruments Directive (MID) gleichzeitig mit der Industrie 4.0 Entwicklung. Für eine belastbare Konformitätsaussage sind oft mehr Prüfpunkte notwendig, wobei die Prüfpunkte je nach Wasserzählerformat variieren.

Zur optimalen Ermittlung von Fehlerkurvenkorrekturfaktoren elektronischer Zähler (Justierung) sind weitere Prüfpunkte notwendig. Diese Messungen sind qualitätsentscheidend und erfordern deshalb eine geringere Messunsicherheit als bei der Kalibrierung.

Die Prüfzeiten für die Kalibrierung von Wasserzählern konnten bereits erheblich reduziert werden. Der Prüfdurchlauf beträgt derzeit 35 Sekunden für die Q1, Q2 und Q3 eines Q3 2,5 R80 Flügelradzählers. Eine Prüfung auf Einzelprüfständen ist jedoch trotzdem nicht ausreichend wirtschaftlich. Deshalb werden nach wie vor Reihenprüfstände verwendet. Bei Einzelstückfertigung und Auftragswechsel entstehen dadurch Lücken, die gefüllt werden müssen.

Zur Lösung der Problematik wird ein Werkstückträgersystem verwendet. Die Werkstückträger bilden die Adaption der Wasserzählerformate an die Reihenprüfanlage. Dies ermöglicht eine gemischte Bestückung der Reihenprüfstrecke.

Prüfablauf

Das Leitsystem des Prüfstandes koordiniert die Werkstückträgerlogistik. Die Identifikation erfolgt über den Wasserzähler selbst oder über die RFID-Tags der Werkstückträger.

Nach der Bestückung der Prüfstrecke stellt das Leitsystem des Prüfstandes das Prüfprogramm zusammen. Es besteht aus der Kombination aller Prüfpunkte der bestückten Wasserzählerformate. Der Prüfstand führt das Prüfprogramm mit 1 zu N Prüfpunkten durch.

Am Ende des Prüflaufes werden alle Prüfpunkte für die Justierung oder die Kalibrierung gemäß dem Anspruch an das jeweilige Format verarbeitet und bewertet.

¹ Alexander Rombach, Rombach Automation, E-Mail: ARombach@1-zu-N.de

² Timo Kienzler, Rombach Automation, E-Mail: tkienzler@rombach-automation.de

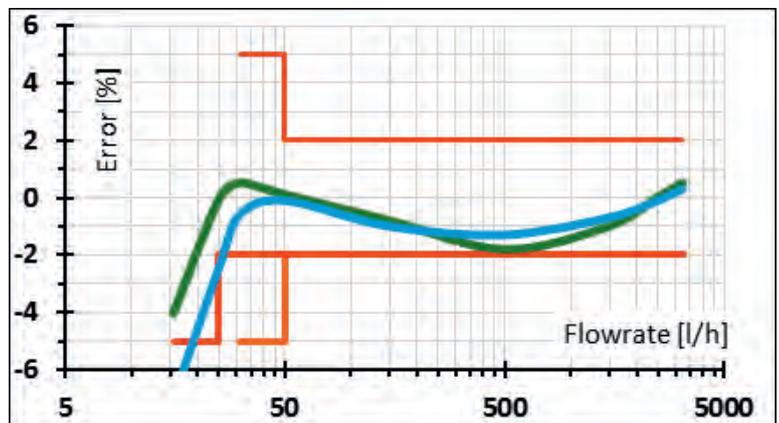


Bild 1: Typischer Verlauf Q₃ 2,5 R80 und Q₃ 2,5 R160 Einstrahler-Format; rote Kurve: Eichfehlergrenze für Kaltwasserzähler



Qualitätssicherung

Zur Qualitätssicherung werden erweiterte Prüfprogramme zur Überprüfung der Charakteristik einzelner Wasserzählerformate stichprobenartig eingeflochten. Dies erfolgt nach einem festgelegten Konzept, das vom Leitsystem gesteuert und ausgewertet wird. Bei Veränderung der Charakteristik wird das Prüfprogramm angepasst.

Erforderliche Messtechnik

Im Kern der Anlage steht ein Doppelkolben-Prüfsystem, das in der Lage ist, diese Aufgabe souverän zu meistern. Das Prüfsystem kann 1 zu N Durchflussprüfpunkte in beliebiger Reihenfolge abarbeiten. Durchfluss, Druck und Temperatur sind unabhängig einstellbar. Jeder Durchflusspunkt kann in 50 Millisekunden eingestellt werden. Die Durchflusskonstanz ist dabei kleiner 10^{-3} .

Messunsicherheitsbetrachtung

Durch die geringe Messunsicherheit des Prüfsystems werden die Prüfzeiten von den Messunsicherheiten des Wasserzählers bestimmt. Eine ausschließliche Betrachtung der Messunsicherheit des Prüfstandes ist deshalb unzureichend.

Die Kenntnis der Messunsicherheit des Wasserzählers ist unerlässlich. Einige Messunsicherheiten können aus der riesigen Datenmenge ermittelt und stetig kontrolliert werden. Weitere Messunsicherheiten werden bei der Einbettung des Prüfsystems in das Rückführungsschema ermittelt und in angemessenen Intervallen verifiziert.

Fazit

Eine flexible Produktion von Wasserzählern erfordert eine hochdynamische Durchflussmesstechnik die mit der zentralen Produktionsteuerung verknüpft ist. Nur durch Anbindung der Messtechnik an die Produktionssteuerung kann die Prüfung unterschiedlicher Varianten und geringer Stückzahlen wirtschaftlich realisiert werden.

Ausblick

Eine, wie vom Fraunhofer IAO [1] prognostizierte, Autonomie und Selbstorganisation liegt in der Anpassung des Prüfprogramms, aufgrund von sich ändernden Charakteristiken bereits vor. Die nächste evolutionäre Entwicklung hin zu einer künstlichen Intelligenz (KI), wäre der Entwurf von Prüfprogrammen durch das Prüfsystem. Es ist grundsätzlich möglich, dass das System durch Zusammenfassung und Auswertung existierender Daten übergeordnete Muster erkennt und dadurch Programme für neue Wasserzählerformate selbstständig entwickelt. Die Kontrolle der Programme obliegt dabei weiterhin dem Menschen.

Literatur

- [1] D. Spath, Hrsg., O. Ganschar, S. Gerlach, M. Hämmerle, T. Krause, S. Schlund, „Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0“, Stuttgart: Fraunhofer Verlag (2013)

Digitalisierungsaspekte im Bereich Prozessinstrumentierung – Verfügbarkeit und Kundennutzen heute

Kurt Polzer¹, Florian Beyer²

„*Digital Enterprise – Implement now!*“ – das Siemens-Motto zeigt: Digitalisierung ist real bei unseren Kunden angekommen. Beim Thema Digitalisierung gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Aspekte. Der Artikel zielt auf Aspekte der Digitalisierung in der Feldebene. Es werden Antworten auf die Fragen „Was ist heute bereits technisch umsetzbar und welche Kundennutzen ergeben sich daraus?“ diskutiert, im Allgemeinen und in der Durchflussmessung im Besonderen.

Folgende Bereiche werden diskutiert:

1. Durchgängige industrielle Kommunikation als Basis für höherwertige Dienste;
2. Aspekte der Integration der Feldebene in die Leittechnik;
3. Integration von Messstellen in Leitsysteme;
4. Web-basierte Visualisierung weit verteilter Messstellen;
5. Remote Maintenance und Services.

Durchgängige industrielle Kommunikation als Basis für höherwertige Dienste

Damit überhaupt eine Implementierung von digitalen Angeboten z. B. ein Wandel hin von vorbeugender zu vorausschauender Wartung möglich ist, bedarf es zu allererst einmal der Verfügbarkeit von Daten. Diese müssen natürlich auch aus den Datenquellen (Sensoren) in das übergeordnete System gelangen. In der Industrie verbreitete Kommunikations-Standards sind u. a. HART, Profibus DP oder PA und Profinet. Es sind zwar auch bereits Rückschlüsse mit einfachsten analogen Signalen (4 mA – 20 mA) möglich, jedoch bleibt dann das größte Potenzial ungenutzt. Viele Sensoren z. B. auch Durchflussmessgeräte von Siemens¹ liefern eine Vielzahl von weiteren Diagnose-, Zustands- und Prozessparametern.

Die Nutzung dieser Daten öffnet die Türen zu völlig neuen Möglichkeiten, angefangen bei einer verbesserten Diagnose bis hin zu komplett neuen Geschäftsmodellen.

Aspekte der Integration der Feldebene in die Leittechnik

Damit eine Integration der in der Feldebene vorhandenen Sensoren gelingt, ist es essenziell, dass es eine Durchgängigkeit der Kommunikation gibt – somit sollte bereits der Sensor idealerweise schon mehr als einen reinen Impuls oder Stromwert liefern. Bei vielen Sensoren ist das HART-Protokoll als Standard vorhanden. In modernen Leitsystemen werden die Sensoren in der Regel an dezentrale Peripheriestationen angeschlossen, diese sind wiederum mit Profinet oder Profibus mit dem zentralen Controller vernetzt. Moderne Leitsysteme wie SIMATIC PCS 7 unterstützen den Zugriff auf die Feldgeräte ohne zusätzliche Verkabelung. Auf diesem Weg werden auch die Diagnosedaten der Geräte im Leitsystem sichtbar und nutzbar.

Integration von Messstellen in Leitsysteme

Eine Kundenforderung an Leitsysteme ist die standardmäßige Einbindung von Feldgeräten in die Automatisierungslösung, unabhängig von Messaufgabe (Druck, Temperatur, Füllstand, Durchfluss) und unabhängig vom Hersteller des Geräts. SIMATIC PCS 7* unterstützt dies mit der umfangreichen Library APL (*Advanced Process Library*) die neben den Funktionsblöcken auf entsprechende Bausteinsymbole und Bildbausteine enthält. Bei einer solchen Standardintegration können die vielfältigen Gerätefunktionen und -daten der SITRANS-Feldgeräte nicht genutzt werden. Deshalb hat Siemens die kostenlose SITRANS Library erstellt, die auf einfachste Weise erlaubt, wichtige Gerätefunktionen – wie zum Beispiel die Dosierfunktion des Durchflussmessers SITRANS F M MAG6000 – in Automatisierungslösungen mit SIMATIC PCS 7 einzubinden. Die SITRANS Library enthält wie die APL-Funktionsblöcke, Bausteinsymbole und Bildbausteine.

¹ Kurt Polzer, Siemens AG, E-Mail: kurt.polzer@siemens.com

² Florian Beyer, Siemens AG, E-Mail: florian.beyer@siemens.com

* Die Erwähnung von kommerziellen Produkten oder Herstellern in Text- oder Bildform geschieht nur zu Informationszwecken und bedeutet in keiner Weise eine Empfehlung der PTB für das Produkt

SIMATIC PDM ermöglicht es, Feldgeräte zu parametrieren, in Betrieb zu nehmen und zu diagnostizieren. Mit der SIMATIC PDM *Maintenance Station* kann dies auch leitsystem- und feldgeräteunabhängig durchgeführt werden. Dabei werden die Diagnosedaten der Feldgeräte in vorgebbaren Zeitintervallen gelesen und für die weitere Verarbeitung in überlagerten Systemen in XML-Dateien gespeichert.

Web-basierte Visualisierung weit verteilter Messstellen

Natürlich besteht die Welt nicht nur aus Leitsystemen, gemessen wird auch an den entlegensten Messpunkten. Auch diese Messwerte sollen natürlich jederzeit und überall zugänglich und visualisierbar sein, dabei gibt es zum Teil nicht einmal eine Energiequelle vor Ort. Mit der SIMATIC RTU kann diese Herausforderung gleich für mehrere Messgeräte gelöst werden. Das batteriebetriebene Gerät ist für einen stromarmen Betrieb optimiert und versendet die gesammelten zeitgestempelten Messdaten der Feldgeräte via E-Mail. Das Versenden zeitgestempelter Daten per E-Mail wird auch vom Durchflussmessgerät SITRANS F M MAG8000 via UMTS/3G unterstützt. SITRANS serve IQ (ehemals SITRANS RMS) liest die Messwerte aus einem E-Mail-Account, speichert die Daten in einer Datenbank ab und bietet eine web-basierte Visualisierung mittels Chrome Browser. Somit können die Daten jederzeit und überall abgerufen werden.

Remote Maintenance und Services

Neben der ständigen und geräteunabhängigen Verfügbarkeit von Daten, ist auch immer häufiger die Anforderung vorhanden, weltweit schnell und kostengünstig Geräte warten oder bei einem Fehlerfall einen Service durchführen zu können. Über eine sichere Datenverbindung via SINEMA RC (*Remote Connect*) haben Kunden sowohl die Möglichkeit, Ihre weltweit verkauften Anlagen zu warten und zu überprüfen als auch sofort im Servicefall Support leisten zu können. Außerdem kann bei Bedarf der *Siemens Technical Support* über eine sichere Verbindung dazu geholt werden und das komplett ohne kostenintensive Reisen an das und Aufenthalte am anderen Ende der Welt. Über das SIPIX SD *Service Tablet* und zusätzlicher Datenbrille kann sich der Servicetechniker vor Ort mit einem Siemens-Experten verbinden und Unterstützung erhalten. Dabei sieht und hört der Experte zu jeder Zeit das Gleiche wie der Techniker vor Ort und kann audiovisuelle Unterstützung leisten.

Zusammenfassung

Es konnten längst nicht alle Aspekte der Digitalisierung, die heute bereits möglich sind, wie zum Beispiel der „*Digital Twin*“ diskutiert werden. Der Nutzen unserer Kunden durch die dargestellten Möglichkeiten ist immens: Erhöhung der Performance einer Anlage, Gerätefunktionen die bereits vorhanden und bezahlt sind einfach nutzen mit der SITRANS *Library*, Reduzierung von Anlagenstillständen durch sichere Fernwartung. Es konnte gezeigt werden, dass mit Fokus auf die Feldebene vieles möglich ist, um die Anlagen unserer Kunden noch effizienter zu machen.

Wie eingangs gesagt:

„*Digital Enterprise – Implement now!*“

Kompaktes 3D-LDA-System mit Selbstjustage

Für die Untersuchung von komplexen Strömungsfeldern mit Strömungsgeschwindigkeitsvektorkomponenten in allen drei Raumrichtungen fehlen bislang auf die SI-Einheiten rückgeführte und damit präzise Verfahren, um z. B. Strömungen in Windkanälen für Kalibrieraufgaben zu messen. PTB-Forscher stellen sich dieser messtechnischen Herausforderung und entwickeln ein kompaktes Messsystem (Messkopf s. Bild). Darin verbirgt sich ein Laser-Doppler-Anemometer, kurz LDA, mit der weltweit einzigen rückgeführten Mehrkomponentenmesstechnik von Strömungsvektoren. Der PTB-Messkopf soll unter anderem als Bezugsnormal in Windkanälen eingesetzt werden

Technische Beschreibung

Das Messprinzip basiert auf dem Laser-Doppler-Referenzverfahren. Bewegt sich ein in der Strömung mitgeführtes Streuteilchen durch den mittleren Sendestrahl (s. Bild), erzeugt es eine Doppler-Frequenzverschiebung. Das gestreute Licht wird von den drei umliegenden Optiken (Beobachtungsstrahlen) empfangen. Aus den drei Frequenzverschiebungen der Beobachtungsstrahlen kann der gesuchte Strömungsvektor berechnet werden. Die Anordnung der Optiken eignet sich besonders für Arbeitsabstände $> 1\text{m}$. Durch Korrelation der Empfangssignale und über Laufzeitmessungen ist das System in der Lage die Ausrichtung der Strahlen zu überprüfen und gegebenenfalls automatisch über Stellenelemente nachzujustieren.

Die messtechnische Rückführung beruht auf der Kenntnis der Laserwellenlänge des Sendestrahls, der rückgeführt gemessenen drei Dopplerfrequenzverschiebungen und der durch die Selbstjustage sichergestellten Beobachtungsgeometrie.

Das System ist dafür konzipiert auch Geschwindigkeiten bis zu 100 m/s rückgeführt messen zu können. Dadurch soll es in Zukunft auch möglich sein, verlässlichere Aussagen zur Einschätzung von Starkwindereignissen und deren Rekonstruktion anbieten zu können.

Wirtschaftliche Bedeutung

Die Erfindung ermöglicht eine auf die SI-Einheiten rückgeführte Messung von dreikomponentigen Geschwindigkeitsvektoren. Besonders profitieren davon Betreiber von Großwindkanälen, weil die Messmethode das Kalibrierangebot erweitern kann. Die Messung von mehrkomponentigen Geschwindigkeitsvektoren ist bspw. auch für Umströmungsanalysen von Interesse. Diese Messungen werden unter anderem zur Evaluierung von Strömungssimulationen und deren Validierung in Großwindkanälen für Fragestellungen aus der Windenergiebranche und der Meteorologie benötigt.

Entwicklungsstand

Das System ist in der Testphase zur Implementierung und Evaluierung der Auswertelgorithmen.



Zu sehen ist der Messkopf des Drei-Komponenten-LDA. Der Lasermessstrahl ist mittig angeordnet; die Beobachtungsstrahlen sind symmetrisch in den Ecken positionierbar angeordnet.

Vorteile:

- Rückführbarkeit von Messungen bei komplexen Strömungen
- Automatische Selbstjustage
- Kosteneinsparung durch geringe Rüstzeiten

Ansprechpartner:

Andreas Barthel
Innovationsmanager
Telefon: +49 531 592-8307
Telefax: +49 531 592-69-8307
E-Mail: andreas.barthel@ptb.de

Dr. Harald Müller
Strömungsmesstechnik

PTB-Nummer 0312



Venturidüsen für die Erzeugung kleinerer Durchflüsse

Vorteile:

- Optimierte Durchflussmessung
- Geringe Betriebskosten
- Genaue Ermittlung des kritischen Zustands

Ansprechpartner:

Andreas Barthel
 Innovationsmanager
 und Patentreferent
 Telefon: +49 531 592-8307
 Telefax: +49 531 592-69-8307
 E-Mail: andreas.barthel@ptb.de

Dr. Rainer Kramer
 Arbeitsgruppe Gasmessgeräte

Verfahren zur Detektion des kritischen Durchflusszustandes

Düsen und Blenden werden im Bereich der Durchflussmessung von Gasen eingesetzt. Oberhalb eines geeigneten Druckverhältnisses zwischen Eingangs- und Ausgangsdruck an der Düse stellt sich ein *kritischer Zustand* ein, bei dem der Volumenstrom unabhängig vom Druck hinter der Düse ist. Durch die neue PTB-Sensorik kann dieser Zustand detektiert werden, um den Energieaufwand für die Differenzdruckerzeugung entscheidend zu minimieren.

Technische Beschreibung

Für die Kalibrierung von Durchflussmessgeräten sind kritische Düsen ein am Markt etabliertes langzeitstabiles Transfornormal. Dabei wird der Durchfluss durch eine geeignete Düse gemessen, indem solange der Druck am Eingang erhöht wird, bis sich der kritische Betriebszustand der Düse einstellt. Ziel ist es hier, den Betriebszustand mit minimalem Energieaufwand zu erreichen.

Die PTB-Erfindung realisiert dieses bei gasförmigen Medien durch eine zusätzliche Sensorik, die den Einfluss der kritischen Strömung auf die Ausbreitung von Schall- und Lichtwellen in der Düse ausnutzt. Die Schall- und Lichtwellen, werden entlang der Strömungsrichtung auf einen Detektor geleitet und das Signal ausgewertet, um den kritischen Zustand zu detektieren.

Wirtschaftliche Bedeutung

Kritische Düsen erlauben die sehr genaue und reproduzierbare Messung von Durchflussmengen. Sie sind in Messgeräten in Kalibrielaboratorien im Einsatz. Unzureichende Anströmung und andere Störeinflüsse führen aber bei geringen Differenzdrücken zum unerwarteten Abbruch der Kritikalität und damit zur Verfälschung des Messergebnisses. Dem wird bisher konstruktiv dadurch entgegengewirkt, dass eine verlässliche „Kritikalität“ des Messaufbaus durch höhere Drücke mit überdimensionierten Pumpen und dem notwendigen erhöhten Energieeinsatz gewährleistet wird.

Entwicklungsstand

Eine Patentanmeldung ist anhängig. Lizenzen für die Nutzung dieser neuen Methode sind verfügbar.

Laser-Doppler-Durchflussmessgerät mit automatisierter Rekonstruktion des optischen Zugangs

Für Volumenstrommessungen mithilfe der Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) muss das Geschwindigkeitsprofil innerhalb der Rohrleitung bestimmt werden. Dazu werden die Fluidgeschwindigkeiten an mehreren Messpositionen innerhalb des Rohres vermessen. Die Geschwindigkeitsinformation ist auf die Kalibrierung des Interferenzstreifenabstandes eines Geschwindigkeitsnormals rück-führbar. Durch die neue PTB-Erfindung wird die Messunsicherheit der Positionsbestimmung deutlich verringert, da nun auch Informationen über die Geometrie und die Brechungsindizes des optischen Zugangs messtechnisch direkt vor Ort erfasst werden.

Technische Beschreibung

Durch das neue Verfahren wird der Verlauf des Laserlichtes nach Durchgang durch den optischen Zugang mithilfe eines Laserstrahlagnosegerätes vermessen, um so durch Anpassung der Parameter der Strahlverfolgungsrechnung auf die Geometrie und die Brechungsindizes des optischen Zugangs zu schließen.

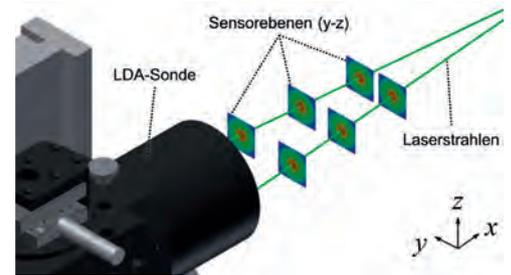
Mit den vermessenen Strahlprofilen kann auf die Geometrien und optischen Eigenschaften der optischen Komponenten geschlossen werden und damit letztendlich der tatsächliche Ort des Messvolumens in der strömenden Flüssigkeit mit höherer Genauigkeit bestimmt werden.

Wirtschaftliche Bedeutung

Durch die verringerte Messunsicherheit bei der LDA gewinnen Produkte und Dienstleistungen im Bereich der LDA deutlich an Attraktivität. Damit ist die Erfindung interessant für alle Anbieter von LDA-Systemen.

Entwicklungsstand

Die Erfindung wurde zum deutschen Patent angemeldet. Lizenzen für die Nutzung dieser neuen Methode sind verfügbar.



Schematische Darstellung des Aufbaus zur Veranschaulichung des Verfahrens zur Vermessung der Laserstrahlen (hier dargestellt ohne optischen Zugang)

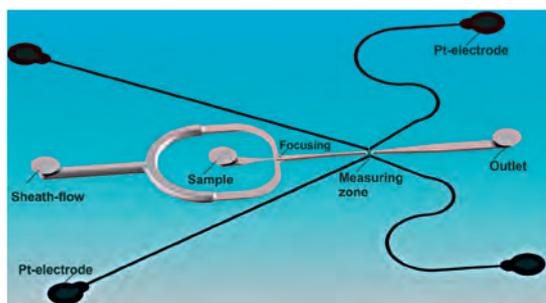
Vorteile:

- LDA mit höherer Präzision
- In-situ-Messung der Strahlprofile
- Optimiertes Ray Tracing

Ansprechpartner:

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

Dr.-Ing. Markus Juling
 Arbeitsgruppe Volumenstrom



Das µFCM (micro flow cytometer) mit Durchflusskanal und für die AC-Messung erforderliche Elektroden

Vorteile:

- Vollblut-Differenzierung ohne Hämolyse
- Zuverlässige Konzentrationsbestimmung
- Kostengünstiges Verfahren

Ansprechpartner:

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

Dr. Jörg Neukammer
 Durchflusszytometrie und
 Partikel Analysis

Label- und hämolysefreie Vollblut-Differenzierung in mikrofluidischen Sensoren mittels AC-Impedanz

Die quantitative Untersuchung von Zellen im Blut mittels Durchflusszytometrie ist ein routinediagnostisches Verfahren in der Hämatologie. Durch die neue PTB-Technologie kann jetzt die zuverlässige Messung der Konzentration der Subpopulationen von Leukozyten mittels AC-Impedanz ohne Hämolyse durchgeführt werden. Somit ist erstmalig eine zuverlässige Vollblut-Differenzierung unter anderem auch bei Leukämiepatienten möglich.

Technische Beschreibung

Die Neuigkeit der Erfindung besteht darin, die Differenzierung der drei Leukozyten-Untergruppen allein durch AC-Impedanzmessungen durchzuführen. Als Präparation der Probe ist ausschließlich eine geeignete Verdünnung notwendig, um die Zählraten der Zellen an die elektronischen Baugruppen und die Datenerfassung anzupassen. Die hämolysefreie Blutprobe wird über ein Mikrokanal-System in ein Wechselfeld eines Sensors zur Messung der elektrischen Impedanz durchgeleitet (typisch 1 bis 10 kHz).

Durch verschiedene Impedanz-Werte können auf diese Weise die darin enthaltenen Blutkörperchen (Erythrozyten, Thrombozyten und Leukozyten) bestimmt werden. Die Subpopulationen von Leukozyten (Lymphozyten (Ly), Monozyten (M) und Granulozyten (Gn)) können ebenfalls zuverlässig bestimmt werden.

Wirtschaftliche Bedeutung

In der Hämatologie ist die Konzentrationsbestimmung von Blutkörperchen ein wichtiges diagnostisches Hilfsmittel und wird auf labormedizinischer Ebene verwendet. Weitere potentielle Anwendungen betreffen die Differenzierung und Konzentrationsbestimmung von Zellen bei onkologischen und immunologischen Fragestellungen sowie die Untersuchung von Algen in Bioreaktoren.

Entwicklungsstand

Das System wurde ausführlich auf Laborebene getestet. Eine deutsche Patentanmeldung ist anhängig. Lizenzen für die Nutzung dieser neuen Methode sind verfügbar.

Pulsationsfreier Antrieb für arbiträre Fluidströme

Die Durchflussmesstechnik benötigt für Prüf- und Kalibrierstände exakte Fluidantriebe, die kontinuierlich konstante Volumenströme erzeugen können. Die neue PTB-Technologie besteht aus zwei geschickt synchronisierten Kolbensystemen, die einen pulsationsfreien und konstanten Fluidstrom bilden können. Der Durchfluss ist außerdem problemlos und schnell variierbar. Durch optische Positionsbestimmung ist die Fördermenge zu jeder Zeit exakt bekannt und der benötigte Betriebsdruck kann ohne Regelventile erreicht werden. Das erlaubt eine Reduzierung des Bauraums, führt zu geringeren Kosten und spart Platz.

Technische Beschreibung

Bisherige Pumpen erzeugen entweder Druckschwankungen im Volumenstrom oder ermöglichen keinen kontinuierlichen Fluss, was in der Durchflussmesstechnik für Probleme sorgt. Die PTB-Erfindung besteht aus zwei getrennt voneinander angesteuerten Verdrängerkolben. Erst erzeugt ein Kolben den gewünschten Durchfluss. Sobald dieser nicht mehr ausreicht, wird der zweite Kolben aktiviert und ermöglicht durch geeignete Ansteuerung einen konstanten Strom. Außerdem sorgen Rückstromsperren für einen gerichteten Transport des fließenden Mediums. Dabei wird die Position der Kolben permanent über eine optische Positionsbestimmung überwacht und ermöglicht das Bestimmen der genauen Fördermenge zu jeder Zeit. Mit Hilfe dieses Prinzips lassen sich platzsparende Pumpen-Layouts realisieren und es gibt weniger bewegliche Bauteile, die synchronisiert werden müssen.

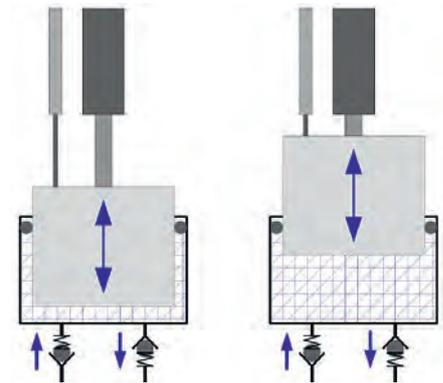
Wirtschaftliche Bedeutung

Die Verwendung der Präzisionspumpe ist in nahezu allen Bereichen der chemischen und pharmazeutischen Industrie, der Produktion, der Energiewirtschaft und auch zur Anwendung in der Medizin denkbar.

Außerdem ist die Verwendung im Rahmen eines Durchflussprüfstands in diversen Prüf-, Kalibrier- und Eichstellen (Messgerätehersteller, akkreditierte Labore, etc.) möglich.

Entwicklungsstand

Ein deutsches Patent ist unter DE102016112196B4 erteilt. Bei Interesse bieten wir Ihnen an, in gemeinsamen Projekten diese Erfindung zu einem Funktionsmuster weiterzuentwickeln oder direkt zu lizenzieren.



Prinzipische Skizze des Zwei-Kolben-Systems: Zwei Kolben erzeugen einen konstanten Volumenstrom, indem sie abwechselnd das Messfluid aus dem Zylinder verdrängen.

Vorteile:

- Die Fördermenge ist jederzeit genau bekannt
- Der Durchfluss ist kontinuierlich und schnell variierbar
- Finanzieller Vorteil durch Reduzierung von Bauraum

Ansprechpartner:

Andreas Barthel
 Innovationsmanager
 Telefon: +49 531 592-8307
 Telefax: +49 531 592-69-8307
 E-Mail: andreas.barthel@ptb.de

Dipl.-Ing. Bastian Peetz
 Arbeitsgruppe Volumenstrom

Impressum

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

Herausgeber

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)

ISNI: 0000 0001 2186 1887

Postanschrift:

Postfach 33 45,
38023 Braunschweig

Lieferanschrift:

Bundesallee 100,
38116 Braunschweig

Redaktion/Layout

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, PTB

Dr. Corinna Kroner (wissenschaftliche Redakteurin)

Dr. Dr. Jens Simon (verantwortlich)

Sabine Siems (Layout / Lektorat)

Telefon: (05 31) 592-82 02

Telefax: (05 31) 592-30 08

E-Mail: sabine.siems@ptb.de

Erscheinungsweise und Copyright

Die PTB-Mitteilungen erscheinen viermal jährlich. Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieser Zeitschrift darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages vervielfältigt oder verbreitet werden. Unter dieses Verbot fällt insbesondere die gewerbliche Vervielfältigung per Kopie, die Aufnahme in elektronische Datenbanken und die Vervielfältigung auf CD-ROM und in allen anderen elektronischen Datenträgern.

Printed in Germany ISSN 0030-834X

Die fachlichen Aufsätze aus dieser Ausgabe der PTB-Mitteilungen sind auch online verfügbar unter:
doi: 10.7795/310.20190199



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

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



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

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



**Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin**
Nationales Metrologieinstitut

Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

Telefon: 0531 592-3006
Fax: 0531 592-3008
E-Mail: presse@ptb.de
www.ptb.de