

Die Aufgaben eines Primärnormals zur Sicherung der Vergleichbarkeit der Kalibrierergebnisse in der Durchflussmesstechnik

Walter Pöschel
Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin
walter.poeschel@t-online.de

Es werden Möglichkeiten zur Verbesserung der Vergleichbarkeit von Kalibrierergebnissen in der Durchflussmesstechnik behandelt und dazu ein neues System der Rückführung von Mess- und Kalibrierergebnissen auf ein Primärnormal des Durchflusses vorgeschlagen. Anforderungen und Aufgaben des neuen Hydrodynamischen Prüffeldes der PTB als künftiges nationales Primärnormal werden dargestellt und die vorgesehenen Methoden zum Nachweis der Messunsicherheit erläutert. Dabei wird ein neuer Ansatz zur realistischen Bewertung der Messunsicherheit durch laborinterne und externe Vergleichsmessungen vorgestellt.

1. Einführung

Es gibt in der Durchflussmesstechnik die seit Langem bekannte Erscheinung, dass Messgeräten und Messergebnissen hohe Genauigkeiten attestiert werden, bei vergleichenden Messungen aber „überraschenderweise“ erheblich größere Unterschiede beobachtet werden, als sie auf Grund der spezifizierten Messunsicherheiten auftreten dürften. Dies trifft nicht nur auf Messungen vor Ort zu, sondern gilt z. T. auch für den Vergleich von Kalibrierergebnissen in verschiedenen Laboratorien.

Die Vergleichbarkeit, d. h. weitgehende Übereinstimmung, der Mess- und Kalibrierergebnisse in verschiedenen anerkannten Prüfstellen und akkreditierten Kalibrierlaboratorien ist aber eine Grundvoraussetzung für die Gewährleistung der Einheitlichkeit und Richtigkeit der Volumen- und Durchflussmessungen überhaupt. Vor dem Hintergrund steigender Genauigkeitsanforderungen in der Praxis erscheint es deshalb notwendig, die derzeit angewendeten Mittel und Verfahren zur Sicherung der Vergleichbarkeit von Kalibrierergebnissen neu zu überdenken.

2. Vergleichbarkeit von Kalibrierergebnissen

Die Ergebnisse der Kalibrierung eines Volumenzählers oder Durchflussmessgerätes in verschiedenen Laboratorien sollen als vergleichbar bezeichnet werden, wenn die ermittelten Kalibrierwerte so nahe beieinander liegen, dass ihre angegebenen Messunsicherheitsbereiche sich überlappen. Um die Vergleichbarkeit der Messergebnisse in akkreditierten Kalibrierlaboratorien zu sichern, werden folgende Maßnahmen getroffen:

- Rückführung der verwendeten Normale auf nationale Normale
- Durchführung einer detaillierten Messunsicherheitsanalyse und Aufstellung eines Messunsicherheitsbudgets nach GUM [1]
- Vergleichsmessungen mit anderen Kalibrierlaboratorien, Teilnahme an nationalen und internationalen Ringvergleichen

Rückführbarkeit von Durchflussmess- und -kalibriereinrichtungen bedeutet in der gegenwärtigen Praxis die Rückführung der darin verwendeten einzelnen Normale und Messmittel für

Volumen, Masse, Dichte, Temperatur und Zeit auf die jeweiligen nationalen Normale durch statische Kalibrierungen. Der Einfluss anderer Elemente und Erscheinungen in den Kalibrier-einrichtungen auf das Messergebnis (z. B. dynamische Einflüsse auf die Waage oder Tempera-tur- und Durchflussschwankungen) werden dabei ebenso wenig erfasst wie der Einfluss der Messbedingungen auf das zu kalibrierende Messgerät.

Diese Art der elementweisen Rückführbarkeit ist zwar eine wichtige Voraussetzung, aber of-fensichtlich allein nicht geeignet, um die o. g. Vergleichbarkeit der Kalibrierergebnisse zu gewährleisten.

Deshalb kommt einer sorgfältigen und detaillierten *Messunsicherheitsanalyse* eine besondere Bedeutung zu. Aber auch hier führt die Abschätzung der bekannten oder vermuteten Unsi-cherheitseinflüsse oft nicht zu einer realistischen Einschätzung der Messunsicherheit des Mess- oder Kalibrierergebnisses. Die Anwendung des GUM bildet zwar eine gute Grundlage für die einheitliche Behandlung und Berechnung der Messunsicherheit und ihrer Komponen-ten, ob aber wirklich alle wesentlichen Einflüsse erfasst bzw. richtig abgeschätzt wurden bleibt eine offene Frage. Außerdem wird auch hier der Einfluss der Messbedingungen (z. B. Temperatur-, Druck- und Strömungsbedingungen) auf das zu kalibrierende Messgerät meist nicht betrachtet, sondern nur dessen Ableseunsicherheit im Messunsicherheitsbudget berück-sichtigt.

Aus diesen Gründen werden *Vergleichsmessungen* empfohlen und zunehmend auch gefordert, um die angegebenen Messunsicherheiten zu überprüfen und zu einer realistischen Einschät-zung der Vergleichbarkeit der Kalibrierergebnisse zu gelangen. Die praktische Durchführung umfassender Vergleichsprogramme bei nationalen und internationalen Ringvergleichen ist je-doch sehr kosten- und zeitaufwendig. Solche Vergleiche werden deshalb nur selten und in eng begrenzten Parameterbereichen durchgeführt. Außerdem ist die Stabilität der verfügbaren Vergleichs- und Transfornormale oft für den Vergleich von Messanlagen höherer Genauigkeit nicht ausreichend. Es erscheint daher dringend geboten, Transfornormale und Vergleichsver-fahren zu entwickeln, die den Anforderungen besser entsprechen.

In den folgenden Abschnitten werden Vorschläge zur Verbesserung der Methoden der Rück-führung und der Messunsicherheitsanalyse gemacht sowie die damit in Zusammenhang ste-hende Funktion und Aufgabe des neuen Hydrodynamischen Prüffeldes der PTB [5,6] als nati-onales Normal des Durchflusses von Flüssigkeiten erläutert.

3. Arten und Methoden der Rückführbarkeit

Für Durchflussmesseinrichtungen gibt es grundsätzlich (wie bei allen abgeleiteten Messgrö-ßen) zwei verschiedene Arten der Rückführbarkeit [2,3]:

Die erste, bereits erwähnte, *elementweise Rückführung* erfolgt durch den statischen Vergleich der in einem betrachteten Durchflussprüfstand verwendeten einzelnen Normalgeräte und Messmittel mit höheren Normalen der entsprechenden Maßeinheiten Volumen, Masse, Dichte und Zeit, auch Temperatur und Druck, die wiederum auf die jeweiligen nationalen Normale rückführbar sind (siehe Bild 1). Diese Art der Rückführbarkeit vollzieht sich also nicht in der letztendlich zu bestimmende Messgröße (z. B. Volumendurchfluss einer Rohrströmung oder Kalibrierwert eines Volumenzählers), sondern geht unmittelbar auf andere Größenarten, von denen die Ergebnisgröße abgeleitet wird (statisches Volumen, Masse, Dichte und Zeit) zu-rück. Die Kalibrierung der entsprechenden Messmittel (Messgefäß, Waage, usw.) erfolgt un-ter statischen Messbedingungen. Ihr Verhalten im realen dynamischen Messprozess wird da-mit nicht erfasst.

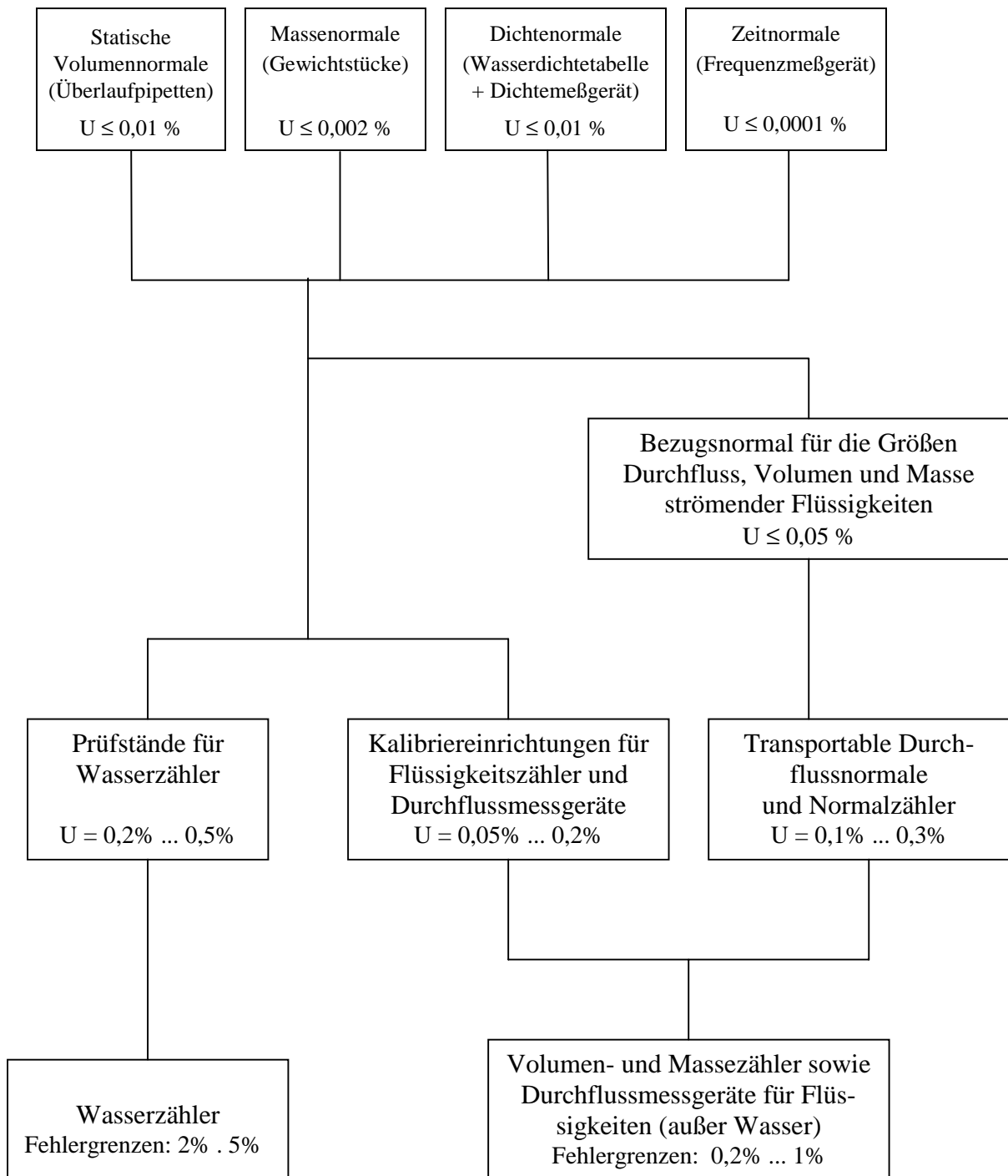


Bild 1: : Normalensystem mit elementweiser Rückführung auf Normale anderer Messgrößen (ohne Durchfluss-Primärnormal)

Weiterhin werden zusätzliche Unsicherheitseinflüsse, wie die Schaltcharakteristik einer Umschaltklappe zum Umlenken des Flüssigkeitsstroms zu Beginn und am Ende einer Messung, Temperatur- und damit Volumenveränderungen im Rohr zwischen Prüfling und Normal, Gaseinschlüsse in der Messflüssigkeit, Temperatur- und Durchflussschwankungen während der Messung u. a. nicht berücksichtigt. Schließlich bleiben auch die für den Vergleich von Kalibrierergebnissen besonders wichtigen Einflüsse der Messbedingungen auf das zu kalibrierende Messgerät selbst völlig außen vor. Dies betrifft insbesondere die Strömungsbedingungen (Geschwindigkeitsprofil, Turbulenzgrad, Drallströmungen, Pulsationen), aber auch Temperatur-, Druck- und Durchflusskonstanz.

Es ist offensichtlich, dass diese elementweise „statische“ Rückführung allein nicht das leisten kann, was i. a. mit dem Begriff „Rückführbarkeit auf nationale Normale“ verbunden wird, nämlich die Sicherung der Einheitlichkeit im Mess- und Kalibrierwesen und damit die Vergleichbarkeit der Kalibrierergebnisse. Um dies zu erreichen, muss eine andere Art von Rückführbarkeit definiert werden, die sich auf das finale Messergebnis selbst bezieht, z. B. auf den ermittelten Kalibrierwert eines zu prüfenden Durchflussmessgerätes.

Diese zweite, im Bereich der Durchflussmessung neuartige Form der *Rückführbarkeit von Durchflussmess- oder Kalibrierergebnissen* wird realisiert durch Vergleichsmessungen mit Hilfe eines geeigneten Durchflussmessgerätes als TransfERNormal zwischen dem betrachteten Durchflussprüfstand und einem Durchflussnormal höherer Ordnung und Genauigkeit, dessen Messergebnisse wiederum in gleicher Weise rückführbar auf ein *Primärnormal des Durchflusses* sind (Bild 2). Diese Art der Rückführbarkeit wird in [2,3] als „dynamische“ Rückführbarkeit (dynamic traceability) und in [4] als „Anschluss“ an das Primärnormal des Durchflusses bezeichnet. Sie macht die elementweise Rückführung nicht überflüssig, sondern ergänzt sie. Deshalb sind in Bild 2 beide Arten der Rückführung dargestellt.

Da die Vergleichsmessungen allen Einflüssen des realen dynamischen Messprozesses sowie der herrschenden Mess- und Umgebungsbedingungen auf Normale und Prüfling (Transfernormal) unterliegen, können deren Ergebnisse als direkter experimenteller Nachweis der Vergleichbarkeit der Kalibrierergebnisse gewertet werden. Zur Überprüfung der Übereinstimmung zweier korrespondierender Kalibrierergebnisse im Rahmen der Messunsicherheiten wird das sogenannte E_n -Kriterium verwendet [7]:

$$E_n = \frac{K_P - K_{HN}}{\sqrt{U_P^2 + U_{HN}^2}} \quad (1)$$

Darin bedeuten K_P den auf dem zu bewertenden Durchflussprüfstand gemessenen Kalibrierwert und K_{HN} den Messwert der gleichen Messgröße, der mit dem Durchflussnormal höherer Ordnung erzielt wurde sowie U_P und U_{HN} die erweiterten Messunsicherheiten dieser Messwerte (Erweiterungsfaktor $k = 2$). Im Falle von

$$|E_n| \leq 1$$

werden die beiden Kalibrierergebnisse als kompatibel betrachtet.

Grundlegende Voraussetzungen für die Anwendung der Methode der Rückführbarkeit von Mess- und Kalibrierergebnissen in einem Normalensystem nach Bild 2 ist das Vorhandensein eines anerkannten Primärnormals (nationales oder regionales Normal) für die Einheiten Volumen- und Massedurchfluss bzw. Volumen (strömend) oder Masse (strömend) sowie von geeigneten TransfERNormalen mit hoher Langzeitstabilität.

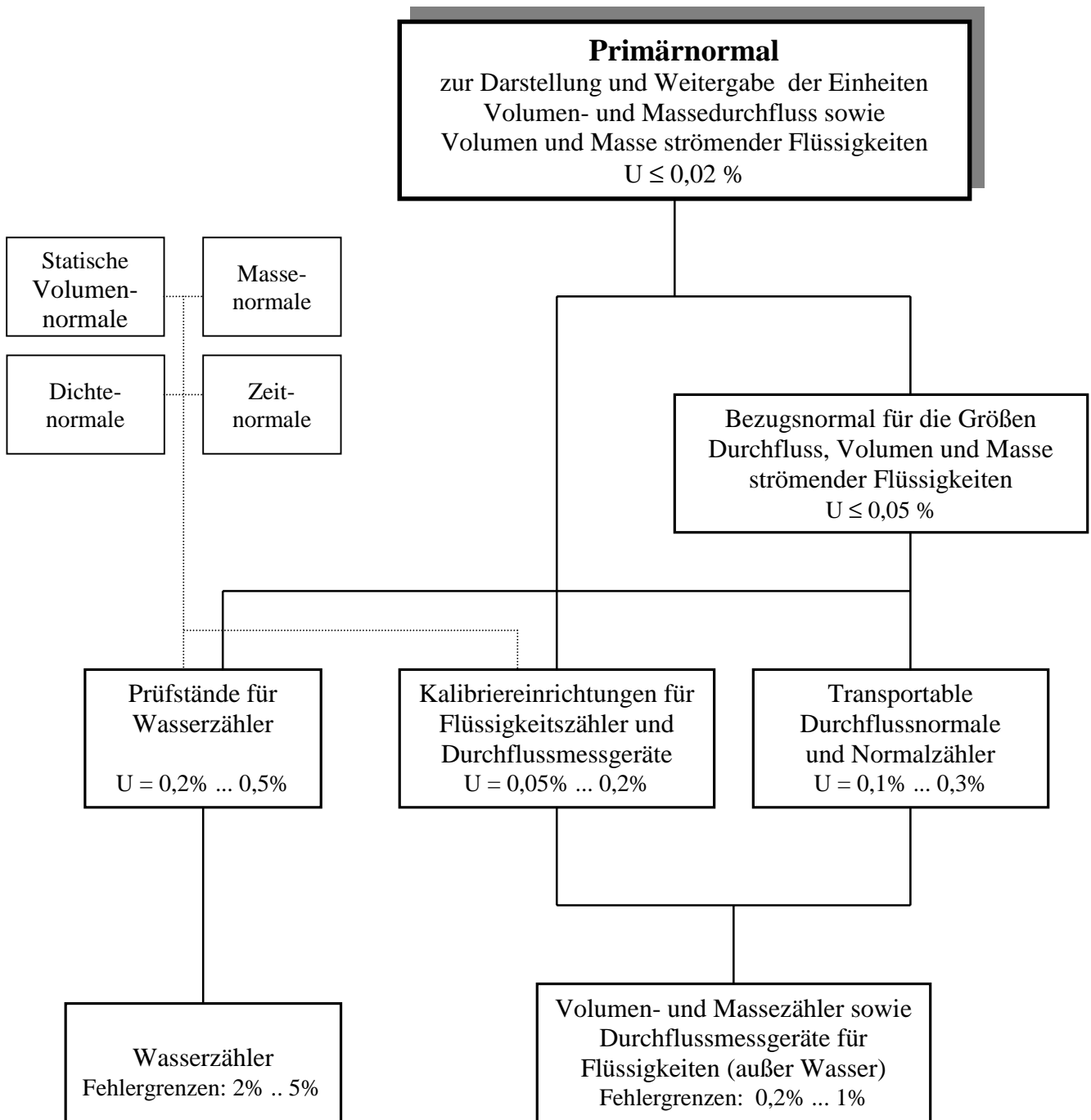


Bild 2: : Normalensystem zur Rückführung der Mess- und Kalibrierergebnisse auf ein Durchfluss-Primärnormal

4. Etablierung eines nationalen Primärnormals für die Flüssigkeitsmessung

4.1 Anforderungen und Aufgaben eines Primärnormals

Hauptaufgabe des Primärnormals an der Spitze eines Normalensystems nach Bild 2 ist es, die Einheitlichkeit und Richtigkeit der Messungen im Mess-, Prüf- und Kalibrierwesen seines Zuständigkeitsbereichs in objektiver, klar verständlicher und leicht nachvollziehbarer Weise zu gewährleisten.

Im Einzelnen muss dazu ein Primärnormal für den Durchfluss von Flüssigkeiten

- a) die Maßeinheiten Volumendurchfluss und Massedurchfluss sowie Volumen (strömend) und Masse (strömend) mit der in seinem Zuständigkeitsbereich höchsten Genauigkeit darstellen,
- b) die nach GUM [1] ermittelte Messunsicherheit der Darstellung der Einheiten (Messunsicherheitsbudget der Einflussgrößen) durch objektive Methoden bestätigen (Langzeitprogramme laborinterner Vergleichsmessungen),
- c) die für seinen Anwendungsbereich geltenden Bedingungen der Weitergabe der Einheiten (Referenzbedingungen für Kalibrierungen) festlegen und bestmöglich realisieren,
- d) transportable Sekundärnormale prüfen und kalibrieren,
- e) die Messunsicherheit stationärer Prüf- und Kalibriereinrichtungen in DKD-, staatlich anerkannten und anderen Prüfstellen durch Vergleichsmessungen kontrollieren und bestätigen und
- f) die Übereinstimmung mit anderen Durchflussnormalen höherer Ordnung durch Teilnahme an internationalen Vergleichen (key comparisons) nachweisen.

Weitere Aufgaben sind:

- g) Forschung und Entwicklung auf den Gebieten
 - Transfernormale hoher Genauigkeit und Langzeitstabilität,
 - Verbesserung der eigenen Messunsicherheit,
 - Einfluss von Strömungsbedingungen, Temperatur, Druck, Viskosität u. a. auf Durchflussmessgeräte verschiedener Bauart,
 - Grundsatzuntersuchungen auf strömungsmechanischem Gebiet,
- h) Zulassungsprüfungen und zulassungsbegleitende Forschungen,
- i) Durchführung von Sonderprüfungen und Kalibrierungen mit höchsten Genauigkeitsanforderungen.

Da das Primärnormal nicht nur die höchste Genauigkeit, sondern auch die beste Realisierung der Referenzbedingungen für Strömung und Umgebung gewährleisten soll, liefert diese Normaleinrichtung gewissermaßen definitionsgemäß die beste Schätzung für den „konventionell richtigen“ Wert einer Messgröße, z. B. des Kalibrierwertes eines Durchflussmessgerätes. Alle Prüf- und Kalibrierlaboratorien im Zuständigkeitsbereich des Primärnormals müssen sich an dessen Messergebnissen orientieren. Das bedeutet, beim Vergleich eines Durchflussprüfstandes mit dem Primärnormal (unter Verwendung ausreichend messstabiler Transfernormale) muss das o. g. E_n -Kriterium erfüllt sein. Andernfalls ist die Messunsicherheit U_P dieses Prüfstandes zu niedrig angesetzt.

4.2 Realisierung eines Primärnormals für die Durchflussmessung von Flüssigkeiten

Es ist vorgesehen, mit dem neuen Hydrodynamischen Prüffeld der PTB ein Primärnormal im obigen Sinne für den Bereich der Flüssigkeitsmessung zu etablieren. Die Messanlage wird in [6] detailliert beschrieben, ihr allgemeiner Aufbau und ihre Funktionsweise braucht daher hier nicht erläutert zu werden.

Als Messgut wird Wasser verwendet. Der Anwendungsbereich als Primärnormal soll sich jedoch nicht auf die Wassermessung beschränken, sondern auch den Bereich der Flüssigkeiten (außer Wasser) umfassen, in dem die Kalibrierung oder eichamtliche Vorprüfung der Messgeräte mit Wasser vorgenommen wird. Dies betrifft, mit Ausnahme des Gebietes der Mineralölmessung, praktisch den gesamten übrigen Bereich der Flüssigkeitsmessung.

Nach den im vorherigen Abschnitt zuerst genannten beiden Anforderungen an ein Primärnormal, waren bei der Planung als Erstes folgende Fragen zu klären:

- a) Welche Messunsicherheit muss für das Primärnormal gefordert werden?
- b) Welche Vorkehrungen müssen getroffen werden, um objektive Nachweismethoden (sprich: laborinterne Vergleichsmessungen) anwenden zu können?

Zur Klärung der ersten Frage wird in Bild 3 ein Überblick über die Messunsicherheiten gezeigt, die in einer Hierarchie gestaffelter Durchflussnormale für die Flüssigkeitsmessung realisiert werden müssen, um eine durchgängige Kette der Rückführung der Kalibrierergebnisse auf das Primärnormal des Durchflusses zu gewährleisten. Es wird dabei nur der Bereich der Flüssigkeiten außer Wasser betrachtet, da hier engere Fehlergrenzen gefordert werden.

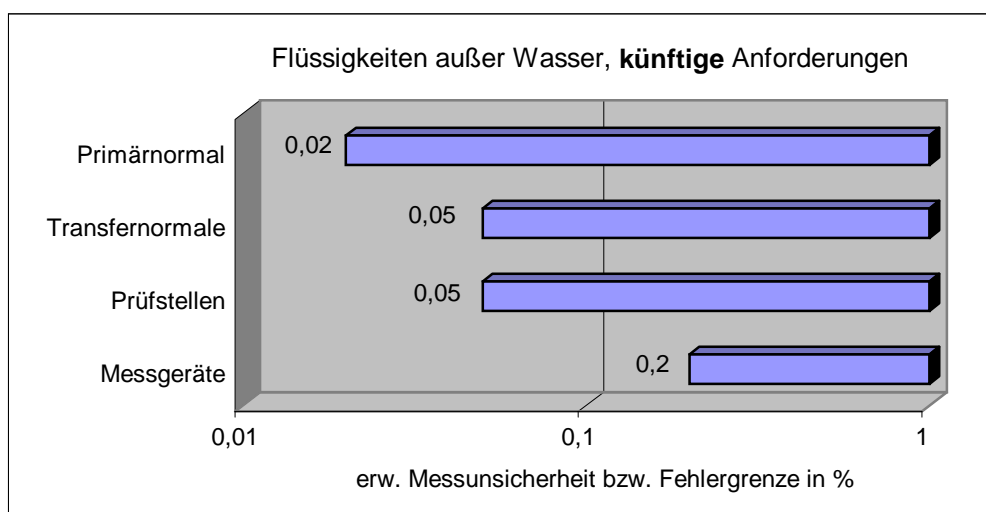
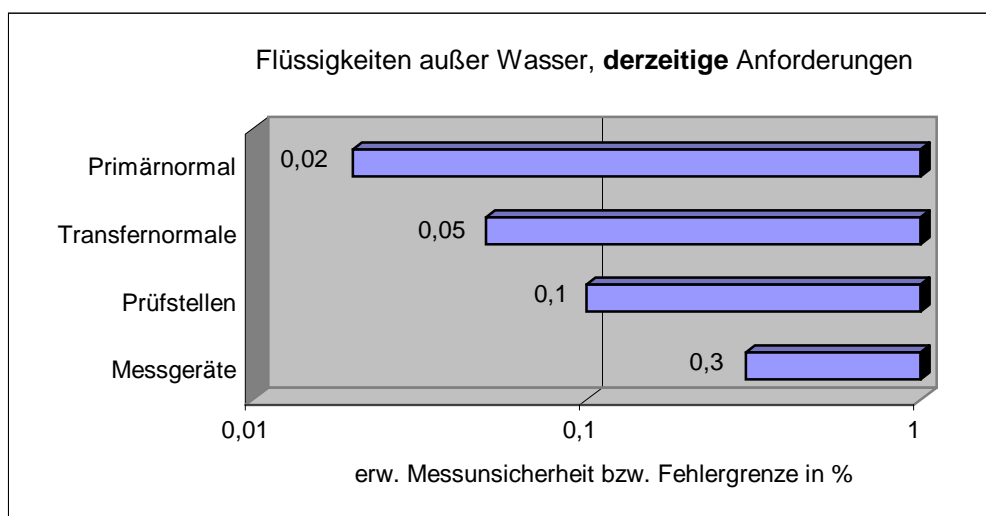


Bild 3: Messunsicherheiten von Normalen und Messgeräten für die Flüssigkeitsmessung

Um Volumenzähler und Durchflussmessgeräte auf Einhaltung einer Fehlergrenzen von 0,3 % (eichamtliche Vorprüffehlergrenze von Volumenzählern für Flüssigkeiten, außer Wasser) bis 2 % (Wasserzähler) prüfen zu können, werden derzeit für die Messeinrichtungen in Prüf- und Kalibrierstellen erweiterte Messunsicherheiten (2σ -Werte) von 0,1 ... 0,2 % gefordert. Teilweise werden auch Werte von 0,05 % und sogar darunter beansprucht oder angestrebt, was für angestrebte Vorprüffehlergrenzen von 0,2 % auch durchaus angemessen ist. Für die Überprüfung solcher Messunsicherheiten durch Vergleichsmessungen sind Transfornormale erforderlich, die eine erweiterte Messunsicherheit von maximal 0,05 % realisieren. Voraussetzung dafür aber ist neben einer hohen Messstabilität der Transfornormale, dass das Primärnormal zur messtechnischen Untersuchung und Einmessung der Transfornormale eine entsprechend geringere Messunsicherheit garantiert. Als anzustrebender Wert wurde 0,02 % festgelegt.

Wesentlich schwieriger zu beantworten ist die zweite Frage: wie ist dieses anspruchsvolle Ziel zu erreichen und die Einhaltung der Messunsicherheit objektiv nachzuweisen? Damit befasst sich der folgende Abschnitt.

4.3 Maßnahmen zur Erreichung und Verifizierung der Messunsicherheit

4.3.1 Theoretische Messunsicherheitsanalyse

Am Anfang der Planung des Hydrodynamischen Prüffeldes stand die Frage, welche konkreten Anforderungen sind an die einzelnen Elemente und Merkmale (Waagen, Umschaltklappen, Dichtemessung, Temperaturmessung, -verteilung und -konstanz, Druck- und Durchflusskonstanz u. a.) zu stellen, damit die Chance besteht, die angestrebte Gesamtmessunsicherheit zu erreichen. Dazu wurde für das zu realisierende gravimetrische Volumen- und Durchflussnormalverfahren eine theoretische Messunsicherheitsanalyse nach GUM [1] durchgeführt und dabei folgendes mathematische Modell des Messprozesses (hier als Beispiel für die Darstellung der Einheit „strömendes Volumen“) zu Grunde gelegt:

$$V_M = \frac{\Delta m_W + \Delta K_W}{\rho_{dest}(\vartheta_{FM}) + K_{\rho F}} K_{LA} [1 + K_{\vartheta} + K_p + K_{KI}] + K_R + K_V + K_G + \delta V_M \quad (1)$$

V_M	Flüssigkeitsvolumen, das während der Meßzeit durch den Prüfling geströmt ist
Δm_W	Differenz der Waagenanzeigen am Ende und zu Beginn der Messung
ΔK_W	Korrektur der Waagenanzeige für Δm_W (einschließlich der Luftauftriebskorrektur bei der Kalibrierung der Waage)
$\rho_{dest}(\vartheta_{FM})$	Dichte des destillierten Wassers
$K_{\rho F}$	Korrektur der Dichte ρ_F der Meßflüssigkeit (aufbereitetes Wasser) gegenüber dem destilliertem Wasser
K_{LA}	Luftauftriebskorrektur für das Volumen der Meßflüssigkeit
K_{ϑ}	Korrektur für die Abweichungen der Thermometeranzeige ϑ_{Th} von der zu messenden mittleren Flüssigkeitstemperatur $\overline{\vartheta_{FM}}$ an der Meßstelle
K_p	Korrektur für die Kompressibilität der Meßflüssigkeit
K_{KI}	Korrektur für Meßabweichungen an der Umschaltklappe
K_R	Korrektur der Volumenänderungen im Rohr zwischen der Meßstelle (am Prüfling) und der Klappe im Verlauf der Meßzeit
K_V	Korrektur für Verdunsten und Versprühen von Meßflüssigkeit
K_G	Korrektur für Meßabweichungen durch Gasblasen in der Meßflüssigkeit

δV_M Standardabweichung von V_M innerhalb einer Meßreihe unter Wiederholbedingungen

Ein Messunsicherheitsbudget wurde in der Weise aufgestellt, dass aus dem angestrebten Wert für die Gesamtmessunsicherheit Grenzen für die Unsicherheiten der einzelnen Einflussgrößen abgeleitet und Forderungen an die Eigenschaften der verschiedenen Komponenten des Prüffeldes festgelegt werden konnten. Auf eine ausführliche Darstellung der Messunsicherheitsanalyse wird hier verzichtet, sie ist in [8] enthalten.

Die folgende Tafel zeigt eine Übersicht über die Ergebnisse der Messunsicherheitsanalyse und die im Einzelnen zu stellenden Anforderungen.

Bezeichnung	Einflussgrößen	Zulässiger relativer Unsicherheitsbeitrag (bezogen auf V_M)	Abgeleitete Forderungen und Maßnahmen
Waagenanzeige	m_W	$5 \cdot 10^{-5}$	Wiederhol-Standardabweichung unter Betriebsbedingungen $< 2 \cdot 10^{-5}$, Drift der Waagenanzeige über einen Tag $< 4 \cdot 10^{-5}$, mindestens täglich eine Kalibrierung der Waage, Korrektur des aktuellen, lastabhängigen Kalibrierwertes bei der Anwendung
Korrektur der Waagenanzeige	K_W	$2 \cdot 10^{-5}$	Standardunsicherheit der Masse der Normalgewichte $\leq 3 \cdot 10^{-6}$ Wiederhol-Standardabweichung bei der Kalibrierung der Waage $\leq 1 \cdot 10^{-5}$
Dichte des destillierten Wassers	ρ_{dest}	$0,3 \cdot 10^{-5}$	Die Dichte des destillierten Wassers wird in Abhängigkeit von der Temperatur aus einer entsprechenden Tabelle entnommen oder mit einer zugeordneten Formel berechnet.
Korrektur der Flüssigkeitsdichte	$K_{\rho F}$	$3 \cdot 10^{-5}$	Häufigere Kontrollen des Wertes $K_{\rho F}$ an Proben im Labor, Vergleiche mit Dichtemessungen im Betrieb.
Luftauftrieb	K_{LA}	$3 \cdot 10^{-5}$	Standardunsicherheiten des Luftdrucks < 5 mbar, der Luftfeuchte 5% und der Lufttemperatur im Wägebehälter < 1 °C. Die Lufttemperatur im Wägebehälter muß zu Beginn und am Ende jeder Messung registriert und Differenzen von > 1 °C bei der Luftauftriebskorrektur berücksichtigt werden. Gleichzeitig darf die Wägebehälterfüllung nicht unter 25% liegen.
Messung der Flüssigkeitstemperatur	K_{ϑ}	$3 \cdot 10^{-5}$	Standardunsicherheiten des Thermometers in der Meßstrecke $\leq 0,05$ °C, max. Differenzen vor der Ein- und hinter der Auslaufstrecke 0,2 °C, maximale Differenzen im Rohrquerschnitt 0,25 °C, Unsicherheit der zeitlichen Mittelwertbildung 0,02 °C, Temperaturkonstanz während einer Einzelmessung $\pm 0,05$ °C, während einer Meßreihe $\pm 0,1$ °C
Kompressibilität der Flüssigkeit	K_p	$0,3 \cdot 10^{-5}$	Fehlergrenze des Manometers 0,1 bar.
Einflüsse durch die Umschaltklappe	K_{kl}	$4 \cdot 10^{-5}$	Justierung der Schaltpunkte in die Strahlmitte (zulässige Abweichung ± 1 mm bzw. ± 5 ms), Meßzeiten > 50 s, relative Durchflußänderung während der Meßzeit $< 5 \cdot 10^{-3}$, Unsymmetrie des Geschwindigkeitsprofils an der Düse 2%, Strahlschnitzeiten $< 0,15$ s.
Volumenänderungen im Zwischenrohr	K_R	$2 \cdot 10^{-5}$	Veränderung der Temperatur im Zwischenrohr während einer Messung maximal 0,1 °C, Einhaltung bestimmter Mindestprüfvolumina.
Einflüsse durch Verdunsten und Verspritzen	K_{Ver}	$2 \cdot 10^{-5}$	Die Änderung der Lufttemperatur im Wägebehälter während einer Messung darf 2,6 °C nicht überschreiten, Leckagen sind zu kontrollieren.
Gaseinschlüsse in der Meßflüssigkeit	K_G	$2 \cdot 10^{-5}$	Kontrolle von Gasblasen durch Entlüftungseinrichtungen und Sichtstrecken
Wiederholstandardunsicherheit	δV_M	$4 \cdot 10^{-5}$	Falls der geforderte Wert in konkreten Fällen für eine Einzelmessung nicht erreicht wird, muß δV_M durch Mittelwertbildung aus mehreren Einzelmessungen verringert werden
Meßergebnis	V_M	$1 \cdot 10^{-4}$	

4.3.2 Die Konzeption eines kombinierten Doppelnormal

Ein wichtiger Gesichtspunkt bei der Planung des Hydrodynamischen Prüffeldes war die Schaffung von Möglichkeiten, durch laborinterne Vergleichsmessungen einen objektiven Nachweis der Messunsicherheit zu erbringen. Dazu wurde bereits in [9] und, weiter ausgeführt, in [10] das Konzept eines kombinierten Doppelnormal entwickelt und z. T. erprobt.

Ein solches Doppelnormal ist im Hydrodynamischen Prüffeld realisiert (Bild 4, Beschreibung des Aufbaus und der Funktion der Anlage siehe [6]). Es besteht aus zwei metrologisch unabhängigen Normalmesseinrichtungen mit etwa gleichem Genauigkeitsniveau, einem gravimetrischen System (Waage mit Umschaltklappe) und einer Rohrprüfstrecke als volumetrisches Normal. Beide Systeme sind hydraulisch so verbunden, dass Messungen der selben Größe (z. B. der Volumendurchfluss im Rohr an der Stelle des Prüflings) quasi gleichzeitig durchgeführt werden können. Damit liegen bei jeder Messung zwei unabhängige Ergebnisse für dieselbe Messgröße vor und laborinterne Vergleichsmessungen können zu jeder Zeit auf einfache Weise durchgeführt werden.

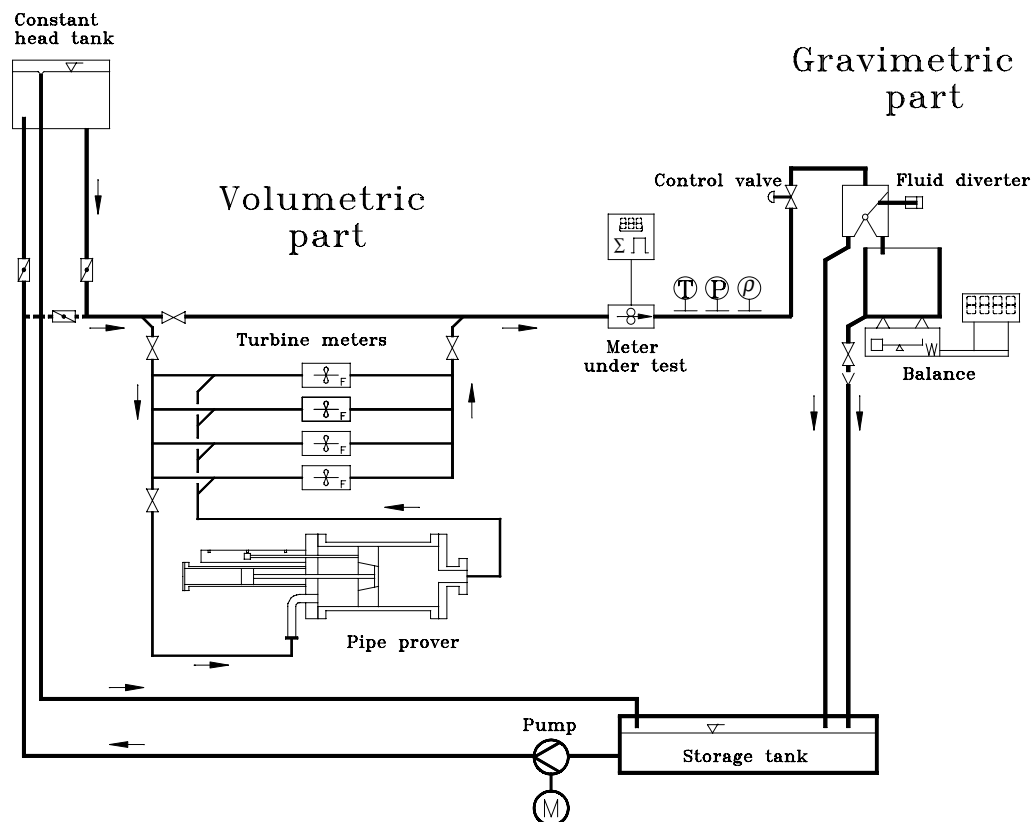


Bild 4: Kombiniertes Doppelnormal für den Durchfluss von Flüssigkeiten mit einem gravimetrischen und einem volumetrischen Teil

Die relative Differenz der beiden Resultate einer Messung ist ein wertvolles objektives Kriterium für die Konstanz der metrologischen Eigenschaften des Primärnormal, ob der Messprozess unter statistischer Kontrolle ist, oder ob systematische Einflüsse eine Rolle spielen. Weiterhin ist es durch die Verwendung von zwei Normalsystemen unterschiedlicher Art (die in unterschiedlicher Weise auf die verschiedenen Einflussgrößen reagieren) auch möglich,

bisher messtechnisch kaum nachweisbare Einflüsse (z. B. Gasblasen in der Messflüssigkeit) mit zu erfassen.

Die zufälligen Schwankungen der gemessenen Differenzwerte sind ein Maß für die zufälligen Komponenten der Messunsicherheit der beiden Normalmesseinrichtungen. Der langzeitige Mittelwert der Differenzen sollte klein gegenüber diesen Schwankungen sein und damit als nicht signifikant betrachtet werden können (Tendenz des kumulativen Mittelwertes gegen Null). Ist dies nicht der Fall, oder spielen Einflüsse in Form einer Drift eine Rolle, muss nach den Ursachen geforscht werden.

Die Möglichkeit, verschiedene Komponenten der Messunsicherheit mit statistischen Methoden experimentell zu bestimmen, eröffnet aber auch generell eine neue Sicht auf die Messunsicherheit selbst und ihre realistische Bewertung. Davon im nächsten Abschnitt.

4.3.3 Ein neuer Ansatz zur realistischen Bewertung der Messunsicherheit

Im Gegensatz zu dem üblichen GUM-Verfahren, bei dem die kombinierte Messunsicherheit aus einer Reihe von Beiträgen berechnet wird, die von den jeweiligen physikalischen Ursachen herrühren und i. a. mit nicht statistischen Methoden abgeschätzt werden müssen (im GUM Typ B genannt), wird in [9] und [10] ein Verfahren vorgeschlagen, das die Gesamtmessunsicherheit in Komponenten aufteilt, die zum großen Teil mit Hilfe von vergleichenden Messungen mit statistischen Methoden ermittelt werden können (Typ A nach GUM). Dieses Verfahren soll das GUM-Verfahren nicht ersetzen, sondern ergänzen.

Die kombinierte Standardunsicherheit $u_c(V_M)$ eines Messergebnisses V_M kann man sich aus Komponenten zusammengesetzt denken, die verschiedene Standardunsicherheiten von V_M bezogen auf unterschiedliche Versuchsbedingungen darstellen:

$$u_c(V_M) = \sqrt{u_k^2(V_M) + u_{m/k}^2(V_M) + u_{lg/m}^2(V_M) + u_{V/lg}^2(V_M)} \quad (2)$$

$u_c(V_M)$	kombinierte Standardunsicherheit von V_M
$u_k(V_M)$	Standardunsicherheit unter kurzzeitigen Wiederholbedingungen
$u_{m/k}(V_M)$	zusätzliche Komponente der mittelzeitigen (von Tag zu Tag oder Woche zu Woche) Standardunsicherheit unter gleichen Bedingungen (Erhöhung gegenüber der kurzzeitigen Standardunsicherheit)
$u_{lg/m}(V_M)$	zusätzliche Komponente der langzeitigen Standardunsicherheit unter vergleichbaren Bedingungen (Erhöhung gegenüber der mittelzeitigen Standardunsicherheit)
$u_{V/lg}(V_M)$	zusätzliche Komponente der Standardunsicherheit unter Vergleichsbedingungen, d.h. bei Vergleichsmessungen mit anderen Normaleinrichtungen (Erhöhung gegenüber der langzeitigen Standardunsicherheit auf der gleichen Normaleinrichtung)

Mit Ausnahme des letzten Terms $u_{V/lg}(V_M)$ lassen sich die aufgeführten Standardunsicherheitskomponenten durch laborinterne Vergleichsmessungen bestimmen, vorausgesetzt es stehen Durchflussvergleichsmessgeräte oder –einrichtungen zur Verfügung, deren Kurz-, Mittel- und Langzeitstabilität ebenso gut oder besser sind als die der zu untersuchenden Normaleinrichtung. Führt man ein geeignetes Langzeitmessprogramm durch und wertet die Ergebnisse mit Hilfe der Methode der Varianzanalyse [11] aus, können die Kurz-, Mittel- und Langzeit-Standardunsicherheiten separiert und getrennt ausgewiesen werden [9].

Die Komponente $u_{V/lg}(V_M)$ der Standardunsicherheit unter Vergleichsbedingungen kann experimentell nur durch Ringvergleiche mit anderen Durchflussnormaleinrichtungen vergleichbarer oder höherer Genauigkeit bestimmt werden. Sie wird daher im allgemeinen Fall zunächst nach der GUM-Methode der Abschätzung einzelner Unsicherheitseinflüsse ermittelt werden

müssen, um später durch externe Vergleiche bestätigt zu werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass hier nur Komponenten einbezogen werden sollen, die langfristig konstant sind, wie mögliche Messabweichungen von Konstanten und Kalibrierwerten (z. B. der Waage oder der Thermometer), die nur in größeren Zeitabständen neu bestimmt werden.

Beim Hydrodynamischen Prüffeld dagegen können durch interne Vergleichsmessungen zwischen der gravimetrischen und der volumetrischen Messeinrichtung nicht nur die zufälligen Kurz-, Mittel- und Langzeitkomponenten der Standardunsicherheit ermittelt, sondern auch eine Aussage zu möglichen systematischen Abweichungen bei Messungen unter Vergleichsbedingungen, d. h. mit verschiedenen Prüfeinrichtungen, getroffen werden. Letzteres ist möglich, da man die Vergleichsmessungen zwischen der gravimetrischen und der volumetrischen Messeinrichtung im Hydrodynamischen Prüffeld als Teil eines Ringvergleichs verstehen kann, der aber zur besseren Absicherung der Ergebnisse durch Einbeziehung externer Vergleiche mit anderen Prüf- und Kalibrierlaboratorien noch erweitert werden muss.

Als Beispiel sei noch einmal auf [9] verwiesen, wo Vergleichsmessungen zwischen einem gravimetrischen Prüfstand und dem experimentellen Aufbau einer Rohrprüfstrecke beschrieben werden. Bild 5 zeigt eine Darstellung der Ergebnisse von Messreihen an 9 verschiedenen Messtagen. Die Auswertung ergab folgende Standardunsicherheitskomponenten:

Relativer Wert der Kurzzeitkomponente (Wiederholbarkeit): $u_k(V_M) = 5,4 \cdot 10^{-5}$

Relativer Wert der zusätzlichen Mittelzeitkomponente: $u_{m/k}(V_M) = 4,1 \cdot 10^{-5}$

Langzeitkomponente (wurde nicht ermittelt)

zusätzliche Komponente der relativen Standardunsicherheit unter Vergleichsbedingungen (geschätzt aus den mittleren Differenzwerten gravimetr. Einrichtung – Rohrprüfstrecke): $u_{V/lg}(V_M) = 8,2 \cdot 10^{-5}$

relative Standardunsicherheit eines einzelnen Messergebnisses $u_c(V_M) = 1,1 \cdot 10^{-4}$

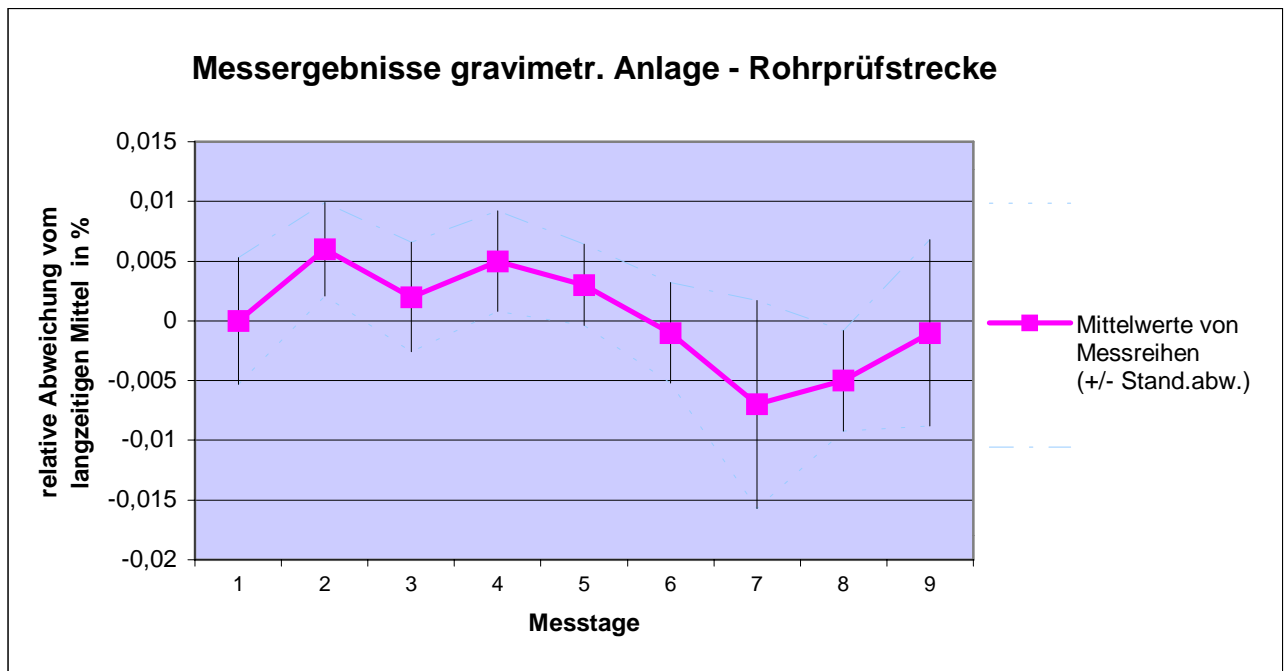


Bild 5: Vergleichsmessungen zwischen einer gravimetrischen (mit Waage) und einer volumetrischen Messeinrichtung (Rohrprüfstrecke)

4.3.4 Weitere Möglichkeiten laborinterner vergleichender Messungen

Zur speziellen Untersuchung und Kontrolle der für die Messunsicherheit besonders wichtigen Einflussgrößen und Elemente des Primärnormals werden weitere Möglichkeiten vergleichender Messungen vorgesehen. Dies betrifft insbesondere die Wägesysteme, die Umschaltklappen, die Bestimmung der Wasserdichte und die Kalibrierung des Volumens der Rohrprüfstrecke.

Jede der drei Waagen im Hydrodynamischen Prüffeld besitzt zwei unabhängig voneinander arbeitende Wägesysteme (siehe [6]) und eine integrierte Kalibriereinrichtung mit Normalgewichten. Damit stehen bei jeder Messung zwei Wägeregebnisse für Vergleichs- und Kontrollzwecke zur Verfügung. Weiterhin können beide Wägesysteme jederzeit (mehrmals täglich) kalibriert und so Langzeitveränderungen ausgeschaltet werden.

Die Umschaltklappen sind weitere wichtige Elemente der Messanlage, die durch das Umlenken des Flüssigkeitsstroms auf den Wägebehälter und zurück den Messvorgang einleiten und beenden. Ungleichmäßigkeiten in diesen Umschaltvorgängen können große Messabweichungen zur Folge haben. Es ist deshalb wichtig, sie sorgfältig zu untersuchen und regelmäßig zu kontrollieren. Dies geschieht unter realen Betriebsbedingungen durch vergleichende Messungen bei konstantem Durchfluss oder mit einem messstabilen Vergleichsgerät, wobei die Ergebnisse von Messungen mit einer Umschaltung denen mit mehreren Umschaltungen (bei denen systematische Messabweichungen deutlicher in Erscheinung treten) gegenübergestellt werden. Das Verfahren ist in [12] näher beschrieben.

Die Bestimmung der Wasserdichte erfolgt auf zweierlei Art und Weise:

- a) durch Berechnung aus der in der Anlage gemessenen Wassertemperatur mit Hilfe eines Polynoms für die Dichte des destillierten Wassers [13] und einem vorher an Proben experimentell ermittelten Korrekturfaktor und
- b) durch direkte Messung mit einem Labordichtemessgerät hoher Genauigkeit und automatischer Probennahme vor Ort.

Durch den Vergleich beider Werte lässt sich die Unsicherheit der Dichtebestimmung bei jeder Durchflussmessung kontrollieren.

Für die Rohrprüfstrecke (das volumetrische Normal der Anlage) ist die Kalibrierung des Messrohres, d. h.. die Bestimmung des Rauminhaltes zwischen zwei Querschnitten, von grundlegender Bedeutung. Sie wird deshalb ebenfalls zu Vergleichs- und Kontrollzwecken nach zwei verschiedenen Verfahren durchgeführt. Die Verfahren und Einrichtungen dazu sowie erste Messergebnisse werden in [14] mitgeteilt.

5. Überprüfung der Messunsicherheit von Prüf- und Kalibrierlaboratorien

5.1 Messunsicherheitsangaben in Prüf- und Kalibrierlaboratorien

In den Publikationen der European Cooperation for Accreditation (EA) und des Deutschen Kalibrierdienstes (DKD) wird festgelegt, welche Messunsicherheitsangabe zur Kennzeichnung der messtechnischen Leistungsfähigkeit von Kalibrierlaboratorien verwendet werden soll [15, 16]. Dazu wird die sogenannte *kleinste angebbare Messunsicherheit* (best measurement capability) definiert, die ein Laboratorium im Rahmen seiner Akkreditierung erreichen kann, wenn es „mehr oder weniger routinemäßige Kalibrierungen von nahezu idealen Messgeräten durchführt“. Das bedeutet, dass alle Unsicherheitsbeiträge, die im realen Messprozess unter üblichen Kalibrierbedingungen eine Rolle spielen können, mit eingeschlossen sind (also auch Schwankungen oder Abweichungen der im routinemäßigen Messbetrieb herrschenden Messbedingungen von den Referenzbedingungen), mit Ausnahme derjenigen, die ausschließ-

lich vom zu kalibrierenden Messgerät selbst verursacht werden (z. B. geringe Auflösung der Prüflingsanzeige). Demgegenüber muss der Einfluss der Unvollkommenheit des Prüflings (z. B. die Wiederholunsicherheit) bei der Angabe der *Messunsicherheit des Kalibrierergebnisses* voll berücksichtigt werden.

Das bedeutet aber, dass die (kleinste angebbare) Messunsicherheit einer Kalibriereinrichtung nicht einfach die Messunsicherheit der Darstellung der Einheit bezeichnet (wie das oft angenommen wird), sondern dass der Einfluss der im routinemäßigen Messbetrieb herrschenden Messbedingungen gebührende Berücksichtigung finden muss. Wie aber ist das zu leisten? Die Antwort ist einfach, wenn man die Forderung der Rückführbarkeit und Vergleichbarkeit aller Mess- und Kalibrierergebnisse auf ein Primärnormal des Durchflusses zu Grunde legt:

Die Messunsicherheit einer Kalibriereinrichtung muss in erster Linie danach festgelegt werden, dass bei einer Vergleichs- oder Nachprüfung mit dem Primärnormal die Übereinstimmung im Rahmen der Messunsicherheiten (E_n -Kriterium, siehe Gl. (1)) gesichert ist. Selbstverständlich soll nach wie vor eine Unsicherheitsanalyse nach GUM durchgeführt werden, aber erfahrungsgemäß müssen die so ermittelten Unsicherheitsbereiche auf der Basis entsprechender Vergleichsmessungen um einen gewissen Betrag erweitert werden, um der erstgenannten Forderung zu genügen. Dies wird in vielen Fällen nicht getan, obwohl z. B. für das europäische und deutsche Kalibrierwesen definitiv festgelegt wurde, dass die Einschätzung der Messunsicherheit „normalerweise durch experimentelle Nachweise gestützt oder abgesichert werden“ muss [15, 16]. Darin sind dann auch die Ursachen von Diskrepanzen bei Kalibrierergebnissen zu suchen.

Zuweilen wird die Frage gestellt, ob und in welchem Maße Unsicherheitseinflüsse, die sich im Messwert des Prüflings darstellen, der Messunsicherheit der Kalibriereinrichtung zugeordnet werden müssen. Dies ist m. E. dann der Fall, wenn diese Einflüsse auf die Anzeige des Prüflings in der Unvollkommenheit der Kalibriereinrichtung ihre Ursache haben. So sind beispielsweise die Auswirkungen von Strömungsstörungen auf den Prüfling der Messunsicherheit der Kalibriereinrichtung zuzurechnen, ebenso der Einfluss von Temperaturveränderungen an verschiedenen Messtagen. Auch die aus einer Messreihe experimentell ermittelte Wiederholstandardunsicherheit wird neben der Prüflingskomponente auch einen Anteil enthalten, der von der Kalibriereinrichtung verursacht wurde.

Um diese Anteile der Messunsicherheit der Kalibriereinrichtung zuordnen zu können, besteht der Wunsch, die Anteile von Prüfling und Kalibriereinrichtung zu trennen. Ein solches Verfahren wird in [17,18] für die Trennung der Anteile von Prüfling und Kalibriereinrichtung an der Wiederholunsicherheit vorgeschlagen und erläutert. Es basiert auf der gleichzeitigen Messung der Kalibrierwerte von zwei hintereinander angeordneten Vergleichsmessgeräten. Aus den Standardabweichungen der Summe und der Differenz der in einem Messvorgang bestimmten beiden Kalibrierwerte lässt sich der Anteil der Kalibriereinrichtung an der Standardabweichung schätzen.

5.2 Durchführung von Vergleichsmessungen

Die bisherigen Ausführungen haben gezeigt, dass Vergleichsmessungen für die realistische Beurteilung der Messunsicherheit unerlässlich sind. Die Durchführung von umfangreichen Vergleichsprogrammen und Ringvergleichen ist aber sehr zeit- und kostenaufwendig. Sie können daher i. a. nur in größeren Zeitabständen realisiert werden und nur einen kleinen Teil der Anwendungs- und Parameterbereiche der teilnehmenden Laboratorien umfassen.

In [10] wurde daher der Vorschlag gemacht, eine Kombination aus internen Vergleichsmessungen (innerhalb des gleichen Laboratoriums) und externen Vergleichsmessungen (zwischen verschiedenen Laboratorien) zur experimentellen Überprüfung der Messunsicherheiten anzuwenden. Es beruht auf dem gleichen Verfahren, wie es bereits in Abschn. 4.3.3 dargestellt

wurde. Als Vergleichsmessmittel werden hier ein, besser aber zwei in Reihe geschaltete, speziell ausgewählte und behandelte Durchflussmessgeräte mit hoher Kurz- und Langzeitstabilität vorgesehen (Vergleichs- und Transfornormale).

Eine Aufteilung der Standardunsicherheit $u_c(V_M)$ eines Messergebnisses V_M kann (analog zu Gl. (2) in Abschn. 4.3.3) z. B. in folgender Weise erfolgen:

$$u_c(V_M) = \sqrt{u_k^2(V_M) + u_{lg/k}^2(V_M) + u_{V_{ext}/lg}^2(V_M)} \quad (3)$$

$u_c(V_M)$	kombinierte Standardunsicherheit von V_M
$u_k(V_M)$	Standardunsicherheit unter kurzzeitigen Wiederholbedingungen
$u_{lg/k}(V_M)$	zusätzliche Komponente der langzeitigen Standardunsicherheit unter annähernd gleichen Messbedingungen (Erhöhung gegenüber der kurzzeitigen Standardunsicherheit)
$u_{V_{ext}/lg}(V_M)$	zusätzliche Komponente der Standardunsicherheit unter Vergleichsbedingungen, d.h. bei externen Vergleichsmessungen mit anderen Normaleinrichtungen (Erhöhung gegenüber der langzeitigen Standardunsicherheit auf der gleichen Normaleinrichtung)

Die kurz- und langzeitigen Standardunsicherheitskomponenten können durch laborinterne, über längere Zeit regelmäßig an Vergleichsmessgeräten durchgeführte Messreihen ermittelt werden. Damit ist es möglich, die Konstanz und über lange Zeit gleichbleibende messtechnische Qualität der Kalibrierergebnisse im Laboratorium selbst durch objektive Methoden nachzuweisen. Externe Vergleichsmessungen mit anderen Normaleinrichtungen, wie dem nationalen Primärnormal, oder die Teilnahme an internationalen Ringversuchen brauchen in diesem Fall nur in größeren Zeitabständen zu erfolgen. Dadurch lässt sich der Aufwand, der mit der Organisation und Durchführung umfangreicher Ringvergleiche verbunden ist, in Grenzen halten.

Auf diese Weise können Prüf- und Kalibrierlaboratorien ihre messtechnische Kompetenz sowohl im Rahmen ihres Qualitätsmanagementsystems als auch Kunden gegenüber eindrucksvoll darstellen. Es ist deshalb sehr zu empfehlen, dass in den Laboratorien entsprechende Vergleichs- und Transfergeräte hoher Messstabilität bereitgehalten werden, die, sorgfältig behandelt und gelagert, ausschließlich für die Zwecke von internen und externen Vergleichsmessungen eingesetzt werden. Die im vorhergehenden Abschnitt erwähnte Methode zur Trennung der Unsicherheitsanteile von Vergleichs- bzw. Transfergeräten einerseits und der zu untersuchenden Kalibriereinrichtung andererseits [17,18] lassen sich hier ebenfalls vorteilhaft anwenden.

Die gleichen hier dargestellten Prinzipien können und sollten auch bei der Durchführung von internationalen Ringvergleichen der nationalen Normale (key-comparisons) Anwendung finden. Auch hier gilt, dass durch interne Langzeituntersuchungen der teilnehmenden Laboratorien Aufwand und Häufigkeit der Ringvergleiche verringert werden kann. Es ist auf dieser Basis auch möglich, umfangreiche Ringvergleiche mit vielen Teilnehmern, die von Planung bis Auswertung oft mehrere Jahre dauern, in kleinere (zwei- oder dreiseitige) Vergleiche aufzulösen, die organisatorisch viel einfacher zu handhaben sind.

6. Zusammenfassung

Die Vergleichbarkeit der Kalibrierergebnisse akkreditierter Prüf- und Kalibrierlaboratorien, d. h. ihre Übereinstimmung im Rahmen der angegebenen Messunsicherheiten, ist nicht immer in genügendem Maße gegeben. Die Gründe liegen darin, dass die bisher angewandten Methoden der Rückführung der Normale und der Bewertung der Messunsicherheit die dynamischen Einflüsse des realen Messprozesses nicht berücksichtigen.

Zur Verbesserung der Situation wird eine für das Gebiet der Durchflussmessung neue Art der Rückführung von Mess- und Kalibrierergebnissen auf ein Primärnormal des Durchflusses mit Hilfe von Vergleichs- und Transfornormalen vorgeschlagen. Das neue Hydrodynamische Prüffeld der PTB wird die Funktion eines Primärnormals für die Flüssigkeitsmessung übernehmen. Die wichtigsten Aufgaben in dieser Funktion sind: die Darstellung der Einheit mit einer erweiterten Messunsicherheit von 0,02 %, die Bestätigung dieser Messunsicherheit durch objektive Methoden vergleichender Messungen und die Teilnahme an internationalen Ringvergleichen, die Prüfung von Sekundär- und Transfornormalen sowie die Kontrolle der Messunsicherheit stationärer Durchflussnormaleinrichtungen in akkreditierten Prüf- und Kalibrierlaboratorien.

Bezüglich einer realistischen Bewertung der Messunsicherheit wird ein neuer Ansatz vorgestellt, der die experimentelle Bestimmung von Komponenten der Messunsicherheit durch laborinterne und externe Vergleichsmessungen ermöglicht.

Literatur

- [1] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM), deutsche Übersetzung: DIN „Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen“, 1. Auflage 1995, Beuth Verlag GmbH Berlin Wien Zürich
- [2] G. E. Mattingly: Dynamic Traceability of Flow Measurements, FLOMEKO 1979, Tokyo (Japan), Proceedings pp. 401-411
- [3] C.A.E. Clay, C. Griffiths, E.A. Spencer: Improving the Confidence in Hydraulic Laboratory Calibrations, FLOW-It's Measurement and Control in Science and Industry, St. Louis (USA), 1981, pp. 789-807
- [4] W. Pöschel, G. Wendt, G.D. Chomjakov, V.D. Kulikov: Gemeinsame Rahmenprüfschemata der UDSSR und der DDR für die Mengen- und Durchflussmessung von Flüssigkeiten und Gasen, Metrologische Abhandlungen, Berlin, 1983, Heft 4, S. 323-332
- [5] W. Poeschel, R. Engel: The Concept of a New Primary Standard for Liquid Flow Measurement at PTB Braunschweig. *Proceedings, the 9th International Conference on Flow Measurement FLOMEKO'98*, p. 7-12, Lund, Sweden, 1998
- [6] R. Engel: Das Hydrodynamische Prüffeld der PTB zur Untersuchung von Durchflussmessgeräten, PTB-Seminar „Neue Entwicklungen bei der Kalibrierung von Durchflussmessgeräten“, PTB Braunschweig, 13.-14. Nov. 2001
- [7] W. Wöger: Remarks on the E_n -Criterion Used in Measurement Comparisons, PTB-Mitteilungen, Braunschweig, 1999, Heft 1, S. 24-27
- [8] Planungsunterlagen für das Hydrodynamische Prüffeld (unveröffentlicht), Kapitel 4: „Meßunsicherheitsbudget und Ableitung von Forderungen für die Erreichung der angestrebten Messunsicherheit“, PTB Braunschweig, 1998

- [9] W. Pöschel: Investigation and Verification of the Measurement Uncertainty of High Accuracy Flowmeter Calibration Devices by Internal Comparing Measurements, Report of the 5th International IMEKO-Conference, Düsseldorf, Okt. 1989 (VDI-Berichte Nr. 768, S. 247-256, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1989)
- [10] W. Poeschel: Internal and External Comparison Measurements for Ensuring Accuracy and Traceability in Flowmeter Calibration, International Symposium on Fluid Flow Measurement, Denver (USA) 1999
- [11] L. Sachs: Angewandte Statistik, Springer-Verlag Berlin, 1974
- [12] DIN-EN 24185: Durchflussmessung von Flüssigkeiten in geschlossenen Rohrleitungen. Wägeverfahren, Ausgabe 1993
- [13] H. Bettin, F. Spieweck: Die Dichte des Wassers als Funktion der Temperatur nach Einführung der Internationalen Temperaturskala von 1990, PTB-Mitteilungen 1990, Heft 3, S. 195-196
- [14] H. Többen: Kalibrierung einer Rohrprüfstrecke nach unterschiedlichen Verfahren, PTB-Seminar „Neue Entwicklungen bei der Kalibrierung von Durchflussmessgeräten“, PTB Braunschweig, 13.-14. Nov. 2001
- [15] EAL-R2: Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, Edition 1, April 1997, European cooperation for Accreditation of Laboratories
- [16] DKD-3: Angabe der Messunsicherheit bei Kalibrierungen, Ausgabe 1998, Deutscher Kalibrierdienst, Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig
- [17] W. Poeschel: Testing the Repeatability of Flowmeter Calibration Devices. Proceedings of the 2nd Brazilian Symposium on flow Measurement, Sao Paulo S.A., Brasilien, 1995, S. 171-181,
- [18] W. Pöschel: Untersuchung der Reproduzierbarkeit von Prüfständen für Gas- und Wasserzähler, DVGW-Schriftenreihe Gas/Wasser Nr. 18, 1995, S. 147-160.