

Messunsicherheitsbestimmung am Warmwasser-Durchflussprüfstand des BEV

Von

Franz Adunka, Wien¹

1 Allgemeines

Mit dem neuen Prüfstand für Durchflusszähler (siehe die Abb. 1) für Wasser können Wasserzähler in folgenden Durchflussbereichen kalibriert werden: $6 \text{ l/h} \leq Q \leq 180.000 \text{ l/h}$. Der Temperaturbereich erstreckt sich von derzeit $30 \text{ °C} \leq t \leq 90 \text{ °C}$ im offenen Prüfkreislauf, jedoch 130 °C im geschlossenen Kreislauf, bei dem ein Vordruck von 10 bar aufgebracht wird, um Verdampfungsvorgänge zu verhindern. In einem späteren Ausbau (\approx Jahr 2002?) sollen auch Wassertemperaturen von etwa 3 °C bis 30 °C zur Verfügung stehen.

Die folgenden Ausführungen zielen auf die Ermittlung der erweiterten Messunsicherheit dieses Prüfstandes im Temperaturbereich von $30 \text{ °C} \leq t \leq 90 \text{ °C}$. Für den Druckbetrieb ist eine eigene Messunsicherheitsabschätzung erforderlich, auf die aber hier nicht näher eingegangen wird.

Das Prinzipschema des Prüfstandes ist in Bild 1 dargestellt. Aus Vorratsbehältern für Warmwasser können insgesamt 7 m^3 Wasser mit Temperaturen von 30 °C bis 95 °C entnommen werden. Dieser Wasserstrom wird der Prüfstrecke zugeführt und anschließend in Behältern, die auf Waagen stehen, gewogen oder direkt zu den Vorratsbehältern zurückgeführt. Die meisten Rohrleitungen sind Doppelmantelrohre, die mit Wasser aus den Vorratsbehältern und hoher Geschwindigkeit gespült werden. Diese Vorgangsweise ist notwendig, damit zwischen dem/n Prüfling/en und den entsprechenden Normalgeräten (Waagebehälter, Masterzähler) keine merkbaren Temperaturunterschiede auftreten.

Für geringe Durchflüsse, bis etwa 2700 L/h wurde auch die Möglichkeit geschaffen, aus einem, 17 m über dem Prüfstand situierten Hochbehälter Wasser zu entnehmen. Die Rohrleitungen sind alle beheizt, so dass Temperaturunterschiede zwischen den Vorratsbehältern und dem Eingang der Prüfstrecke kleiner als $0,2 \text{ K}$ erreichbar sind.

Für Temperaturen größer als ca. 95 °C kann ein Vorratsbehälter, mit einem Fassungsvermögen von 1 m^3 von den anderen Vorratsbehältern abgekoppelt und unter Druck gesetzt werden. Es wird ein geschlossener Kreislauf aufgebaut, der den/die Prüfling/e enthält, wobei alle Verbindungen geschraubt werden. Als Normale verwendet man Masterzähler, deren Temperatureinfluss auf die Anzeigecharakteristik bekannt ist. Damit können Kalibrierungen bei Wassertemperaturen bis etwa 130 °C durchgeführt werden.

Für die definierten Betriebszustände kann man folgende Kalibriertechniken unterscheiden:

1. **Kalibrierung im Start/Stoppbetrieb:** Zu Beginn des Kalibriervorganges wird der Durchfluss von Null bis zum Sollwert sehr rasch aufgebaut, am Ende ebenso rasch wieder abgebaut. Durch diese Prozessführung wird die Fehlerkurve des Prüflings in beiden Richtungen durchlaufen, wodurch eine Mittelwertbildung über die Fehlerkurve erfolgt. Bei exakter Kenntnis des Zeitverlaufes des An- und Abschaltvorganges sowie der Cha-

¹ Univ.-Prof. Dr. Franz Adunka, Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV), Gruppe Eichwesen, A-1163 Wien, Arltgasse 35; e-mail: F.Adunka@metrologie.gv.at

rakteristika der beteiligten Ventile könnte die systematische Messabweichung sogar berechnet und korrigiert werden. Einfacher ist aber die experimentelle Ermittlung durch Vergleich von Meßabweichungen im Start/Stop- und im fliegenden Betrieb (siehe 2.). Zugute kommt bei dieser Prüfungsart, dass der vorgewählte Durchfluss im Spülbetrieb eingefroren wird und sich bei Beginn der eigentlichen Kalibrierung sehr rasch einstellt. Im Start-Stopbetrieb treten außerdem Druckstöße auf, die eventuell vorhandene Luft komprimieren können, was auch einen Beitrag zur Messunsicherheiten liefert.

- 2. Kalibrierung im fliegenden Betrieb:** Der Durchfluss wird vor dem eigentlichen Kalibriervorgang aufgebaut, wobei das den Zähler durchflossene Wasser nicht in die Waage, sondern in den Vorratsbehälter zurückgeführt wird.

Zu einem bestimmten, meist vom Prüfling selbst ausgelösten Zeitpunkt wird das Messgut vom geschlossenen Betrieb (Vorratsbehälter → Prüfling → Vorratsbehälter) in den Waagebehälter geleitet, wobei vorerst eine Prüfmenge V_p vorgewählt wird. Nach Start des Messprozesses löst ein Impuls des Prüflings den Messvorgang aus, in dem das zu registrierende Volumen in die Waage geleitet wird. Nach Erreichen der gewünschten Menge (V_p) wird wieder, über einen Impuls des Zählers, in den geschlossenen Betrieb umgeschaltet. Ein Hauptproblem stellt dabei die Umschaltvorrichtung dar, da sowohl beim Hin-, als auch beim Zurückschalten für eine geringe, aber doch merkbare Zeit das Messgut in undefinierte Richtung fließt.

Die Ermittlung der Messabweichung des Prüflings erfolgt durch Vergleich mit einem Masterzähler, dessen Messabweichung bei jedem Prüfdurchgang durch Wägung ermittelt wird. Da die Kalibrierung mehrerer Zähler gleichzeitig möglich ist, ist dies die einzige vernünftige Vorgangsweise. Den Zeitablauf mag die folgende Abbildung 2 erläutern.

- 3. Kalibrierung mittels Masterzähler (fliegender Betrieb (2)):** Als Variante zum oben beschriebenen fliegenden Betrieb ist es auch möglich, den Prüfling unmittelbar mit dem Masterzähler zu vergleichen. Dabei wird ein Ausgangssignal des Prüflings zum Start des Prüfvorganges verwendet, bei dem Ausgangssignale des Masterzählers registriert werden (siehe dazu auch Abb. 2). Nach einer vorgewählten Zahl von Ausgangsimpulsen des Prüflings wird der Registriervorgang unterbrochen. Die Ermittlung der Messabweichung erfolgt dann durch Vergleich der volumenbewerteten Ausgangsimpulse des Prüflings- und des Masterzählers. Die Messabweichung des Masterzählers als systematische Messabweichung kann leicht berücksichtigt werden. Für die Messunsicherheitsermittlung ist aber in jedem Fall die Stabilität des Masterzählers zwischen den Kalibrierungen, beispielsweise durch Wägung, zu berücksichtigen. Besonders für den Druckbetrieb sind auch noch die Temperaturabhängigkeiten der Messabweichungen des/der Masterzähler/s zu bestimmen.

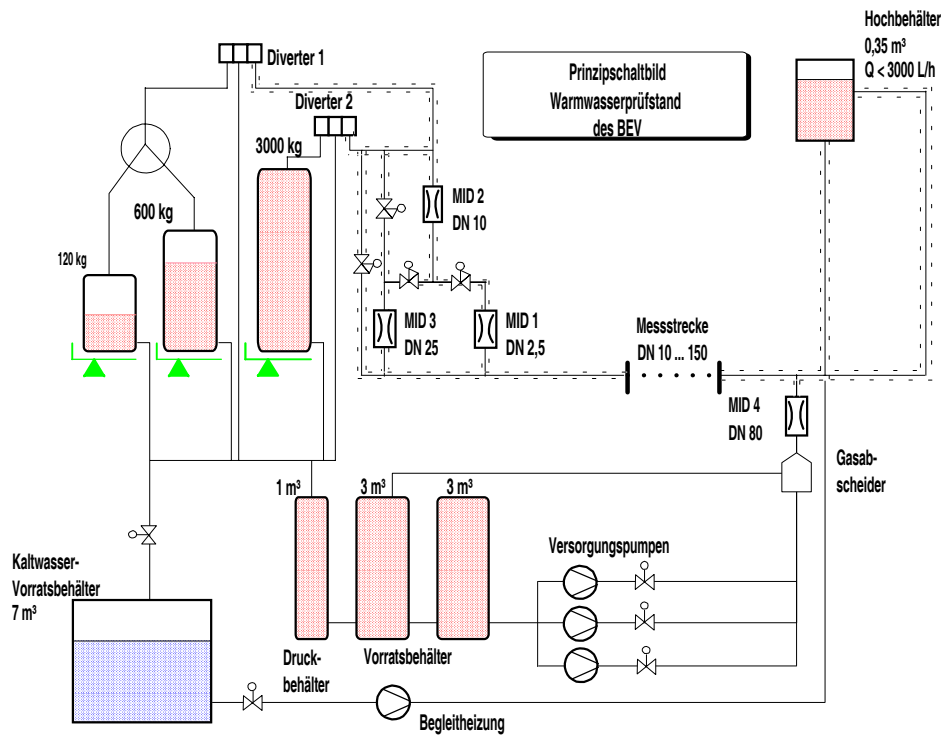


Abb. 1: Prinzipschaltbild der betrachteten Prüfeinrichtung für Wasserzähler und Durchflusssensoren von Wärmezählern. Die Prüflinge werden in der Messstrecke eingebaut. Aus den Vorratsbehältern, die untereinander verbunden sind, wird warmes Wasser entnommen und mittels der Pumpen 1 oder 2 durch die Prüfstrecke gefördert. Je nach Durchfluss und vorgewählter Prüfmenge wird eine der Waagen 1 bis 3 angewählt. Die Pumpe 3 dient der Wasserversorgung der doppelwandig ausgeführten Rohre (strichliert angedeutet), die eine Abkühlung des Prüfwassers im messtechnisch relevanten Bereich auszuschließen. Für geringe Durchflüsse bis $Q \leq 2700 \text{ L/h}$ kann auch der Hochbehälter verwendet werden, der aufgrund seiner Montagehöhe einen Druck am Eingang der Prüfstrecke von 1,7 bar erzeugt.

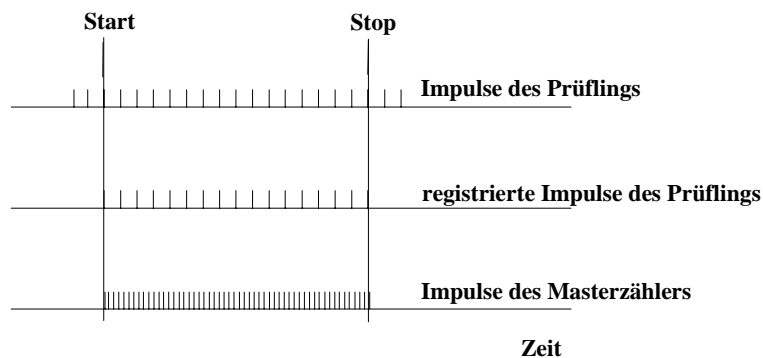


Abb. 2: Impulsvergleich bei der Kalibrierung durch Wägung. Die vom Prüfling ausgegebenen Impulse steuern den Messvorgang, der ein Zeitfenster definiert, in das Impulse eines Masterzählers eingelesen werden.

2 Korrekturen und Umrechnungen

2.1 Berücksichtigung systematischer Messabweichungen

Bei jedem Messvorgang, in den ein Wägeregebnis eingeht, sind systematische Messabweichungen, die beispielsweise durch bekannte Korrekturen der Waage oder durch systematische Messabweichungen des/der Masterzähler auftreten, zu berücksichtigen (Kalibrierschein der Waage bzw. des/der Masterzähler!).

2.2 Berücksichtigung von Auftrieb, Dichte und Verdunstung im Waagenbehälter

Der Wägevorgang dient zur Ermittlung des Sollvolumens, das den Prüfling passiert hat. Um vom Wägeregebnis zum Sollvolumen zu kommen, sind Umrechnungen notwendig, die auf folgende Tatsachen zurückzuführen sind:

- (1) Es wird bei der Wägung nicht die Masse, sondern ein Wägewert ermittelt, der sich von der tatsächlichen Masse des Wägegutes unterscheidet. Die Ursache für diesen Unterschied liegt darin begründet, dass das Prüfgut in der Regel eine andere Dichte als die Vergleichsgewichtsstücke hat. Die Dichte der Normalgewichtsstücke wurde per Übereinkunft mit $\rho_N = 8000 \text{ kg/m}^3$ (Edelstahl) festgelegt. Hat das Wägegut die gleiche Dichte, stimmt das Wägeregebnis mit der Masse überein. In unserem Fall ist aber die Dichte des Prüfgutes Wasser geringer als jene der Normalgewichtsstücke, nämlich nur etwa $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$. Man erhält somit eine Anzeige der Waage, genannt Wägewert W , die auf Grund der folgenden Überlegung für das Wägegut Wasser größer ist als deren Masse m_w : Ist die Dichte des Wassers ρ_w und nimmt sie ein Volumen V_w ein, dann wird ein gleiches Volumen an umgebender Luft verdrängt (Auftrieb!). Analoges gilt für die Vergleichsgewichtsstücke ρ_N mit der Masse m_N und dem Volumen V_N . Man findet daher für den Gleichgewichtszustand der Waage:

$$W - V_w \rho_{Lu} = m_N - V_N \rho_{Lu} \quad \text{und daraus:} \quad W = \frac{1 - \frac{\rho_{Lu}}{\rho_N}}{1 - \frac{\rho_{Lu}}{\rho_w}} m_N \quad (1)$$

Ist die Dichte des Wägegutes ρ_w gleich jener der Normalgewichtsstücke ρ_N , ist der Wägewert W identisch mit der Masse der Vergleichsgewichtsstücke m_N , in anderen Fällen ist mit Abweichungen zu rechnen. Für das Wägegut Wasser mit einer Temperatur von $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ist die Abweichung des Wägewertes von der Masse nach Gl. (1): 1,0010658. Um diesen Wert wird also zuviel angezeigt; er ist als systematischer Einfluss zu korrigieren. Für trockene Luft mit der Dichte $\rho_L = 1,2 \text{ kg/m}^3$ ergibt sich für das Wasservolumen die einfache Näherungsbeziehung:

$$V_W \approx m_N \frac{999,850}{\rho_w - 1,2}, \quad (2)$$

die wir an anderer Stelle noch benötigen werden.

- (2) In Gl. (1) wurde auch der Auftrieb als Masse der verdrängten Luft mit der Dichte ρ_{Lu} berücksichtigt. Die Dichte der verdrängten Luft ist aber von der Temperatur und von der Luftfeuchte abhängig. Letztere ist entscheidend, da feuchte Luft eine deutlich niedrigere Dichte hat als trockene. Dies ist verständlich, wenn man die Molekulargewichte trockener Luft $M_{Lu} = 28,8$ (80 % N_2 und 20 % O_2) und von reinem Wasserdampf $M_{H_2O} = 18$ vergleicht! Die Berücksichtigung der Verdunstungsverluste ist sehr schwierig, aber nichts-desto-Trotz äußerst wichtig. Betrachten wir dazu die Abb. 3, die die zu- und abfließenden Massenströme bei einem Wägevorgang zeigt. Die Berücksichtigung eventueller Verdunstungsverluste geht auf eine Untersuchung von Witt zurück, die den Wägevorgang in einem Behälter unter Berücksichtigung der zu- und abfließenden Massenströme analysiert hat. Dazu wird der Feuchtigkeitsverlauf im bzw. in den Austrittsschlitzen des Behälters durch einen Feuchtesensor vor, während und nach einem Messvorgang bestimmt.

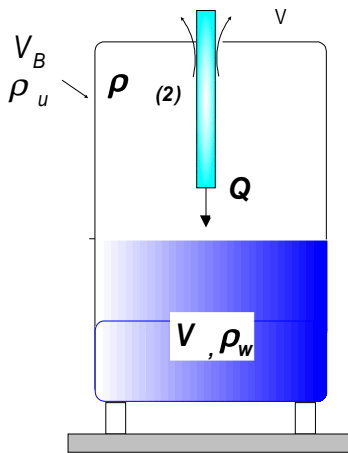


Abb. 3: Zur Berücksichtigung von Dichte, Auftrieb und Feuchteverlust in einem Behälter

Abb. 3: Zur Berücksichtigung von Dichte, Auftrieb und Feuchteverlust in einem Behälter

Man erhält für die in den Behälter einströmende Wassermenge m_p , wenn angenommen wird, dass der Behälter zu Beginn leer war:²

$$m_p = \frac{(1 - \frac{f_2}{\rho_w}) \Delta W (1 - \frac{\rho_{Lu}}{\rho_N}) - V_0 (\rho_{L2} - \rho_{L1})}{(1 - \frac{\rho_{L2}}{\rho_w})} - V_B (f_2 - f_1) + m_v \quad (3a)$$

In dieser Gleichung bedeuten:

ΔW ... die Differenz der Wägewerte nach und vor der Messung

V_B ... das Behältervolumen

m_v ... den aus dem Behälter austretende Luftmenge (Masse!), die durch die Beziehung:

$$m_v = \int_0^{\tau_p} f(\tau) \frac{dV_L}{d\tau} d\tau = \int_0^{\tau_p} f(\tau) Q d\tau \quad \text{gegeben ist.} \quad (3b)$$

V_L ... Luftstrom, der während der Messung aus dem Behälter austritt

² Diese Gleichung stammt aus einer privaten Mitteilung von Dipl.-Ing. Alfons Witt, Österreichisches Forschungszentrum Seibersdorf

- Q ... Durchfluss des zufließenden Wassers
 τ ... Zeit
 τ_P ... Prüfzeit
 f_1 ... absolute Luftfeuchte im Behälter vor der Messung
 f_2 ... absolute Luftfeuchte im Behälter nach der Messung
 $f(\tau)$... Feuchteverlauf während des Meßvorganges
 ρ_W ... Dichte des Wassers im Behälter
 ρ_{Lu} ... Dichte der den Behälter umgebenden Luft
 ρ_{L1} ... Dichte der Luft im Behälter vor der Messung
 ρ_{L2} ... Dichte der Luft im Behälter nach der Messung
 ρ_N ... Dichte der Normalgewichtsstücke (= 8000 kg/m³)

Mit Gl. (3a) und (3b) erfolgt nicht nur die korrekte Umrechnung der Dichte und die Auftriebskorrektur mit der richtigen Luftfeuchtigkeit, sondern es wird auch der Massenverlust berücksichtigt, der durch Verdrängung der Behälterluft durch die einströmende Wassermenge verursacht wird. Als verbleibende Messunsicherheit ist dann lediglich der Anteil von der Feuchtigkeitsbestimmung maßgebend; er wird als zufällige Messunsicherheit behandelt.

Tabelle 1: Messbereiche und Wertigkeit der Ausgangsimpulse der vier Masterzähler (MID)

Masterzähler	Messbereich	Impulswertigkeit
	in L/h	in Impulse/L
MID 1	6 ... 150	10 ⁴
MID 2	>150 ... 1.800	10 ³
MID 3	>1.800 ... 17.000	10 ²
MID 4	>17.000 ... 180.000	10

2.3 Systematische Meßabweichung der Masterzähler

Bei der Kalibrierung von Prüflingen wird stets mit dem passenden Masterzähler verglichen. Die systematische Meßabweichung wird bei jeder Kalibrierung durch Wägung ermittelt und kann somit als berücksichtigt angesehen werden. In Tabelle 1 sind für die vier verwendeten Masterzähler, ausgeführt als magnetisch-induktive Durchflusszähler (MID), die Messbereiche und die Wertigkeit eines Impulses in Abhängigkeit vom Meßbereich angegeben.

3 Ermittlung der Messunsicherheit

Wir wollen im folgenden die Messunsicherheit der beschriebenen Prüfanlage abschätzen. Dazu müssen wir aber beachten, dass die Messunsicherheitsquellen einerseits der Messanlage, andererseits aber dem zu prüfenden Zähler zuzuschreiben sind. Die erweiterte Messunsicherheit wird also entscheidend auch vom Prüfling mitbestimmt.

Zur Abschätzung der Einflüsse wählen wir als Beispiel folgenden Zähler aus: Flügelradzähler der Nenngroße $Q_n = q_p = 1,5 \text{ m}^3/\text{h}$, metrologische Klasse C, das entspricht einem Verhältnis des Nenndurchflusses $Q_n (q_p)$ zum Mindestdurchfluss $Q_{min} (= q_i)$ von 100. Wir werden den Messunsicherheitsbeitrag (Varianz) für die beiden Eckpunkte Q_n und Q_{min} ermitteln.³ Der Zähler habe einen Impulsausgang mit einer Wertigkeit von $I = 100$ Impulse pro Liter. Verursacht durch die Prüfeinrichtung und den zu prüfenden Zähler können nun die folgenden Einflussquellen auftreten:

- (1) Auflösung des Prüflings (f_1)
- (2) Auflösung des Masterzählers (f_2)
- (3) Genauigkeit der Waage (f_3)
- (4) Langzeitstabilität der Waage (f_4)
- (5) Einfluss der Temperaturmessung auf die Volumenermittlung mittels Wägung (f_5)
- (6) Temperaturabfall bzw. Temperaturänderung des Rohrleitungssystems (f_6)
- (7) Luft im Rohrleitungssystem (f_7)
- (8) Umschaltvorrichtung (f_8)
- (9) Feuchtigkeitsmessung (f_9)
- (10) Masterzählers (f_{10})
- (11) Durchflussschwankungen (f_{11})
- (12) Einfluss des Start-Stopp-Betriebes (f_{12})
- (13) Druckeinfluss (f_{13})

Die Empfindlichkeitskoeffizienten ($\partial V/\partial f_i$) sind in den meisten Fällen 1, weil sich die Einflüsse direkt als Fehlervolumen ausdrücken lassen. Besser ist es, wenn möglich, den Einfluss als relativen Einfluss auszudrücken, wodurch sich die Ermittlung der Empfindlichkeitskoeffizienten erübrigt.

Auflösung des Prüflings (Einfluss f_1)

Die Anzeige des Prüflings sei V_p ; mit der Auflösung des Volumens δV_p erhält man für das angezeigte Volumen daher:

$$\left(V_p \pm \frac{\delta V_p}{2}\right) \quad (4)$$

δV_p kann der Teilungswert oder auch das einem Impuls zugeordnete Volumen sein. Somit ergibt sich mit $a_p = \delta V_p/V_p$ unter der Annahme einer Rechteckverteilung für die entsprechende Varianz:

³ Für Warmwasserzähler gelten die genannten Bezeichnungen; für Durchflusssensoren für Wärmezähler hat man dagegen neue Bezeichnungen eingeführt. So entsprechen Q_n : q_p und Q_{min} : q_i . Wir werden aber in der Regel die alten, eingeführten Bezeichnungen beibehalten.

$$u_A^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{\delta V_P}{2 V_P} \right)^2 = \frac{\delta V_P^2}{12 V_P^2} \quad (5)$$

Werden die Impulse, wie im vorliegenden Fall, synchronisiert, verschwindet dieser Varianzbeitrag. Bei Verwendung von Reedkontakten zur Abtastung des Durchflusssensors ist der nicht exakt zu definierende Schaltzeitpunkt eine Unsicherheitsquelle. Das von einem Schaltimpuls des Reedkontaktes erfaßte Volumen ist δV_{RK} . Da in der Regel der Reedkontakt einmal pro Umdrehung eines abzutastenden Zeigers schaltet, kann das der zugeordneten Varianz entsprechende Volumen mit einem Zehntel des Skalenteilungswertes (oder $\delta V_{RK}/10$) angenommen werden. Für diesen Fall erhält man dann:

$$u_{A,RK}^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{\delta V_{RK}}{20 V_P} \right)^2 = \frac{\delta V_{RK}^2}{1200 V_P^2} \quad (6)$$

Auflösung des Referenz- oder Masterzählers (f_2)

Da die Synchronisation nach den Ausgangsimpulsen des Prüflings (der Prüflinge) erfolgt, kann es bei der Erfassung der Masterzählerimpulse zu einer Unsicherheit von ± 1 Impuls kommen. Mit der Auflösung δV_{MZ} des Masterzählers und der Prüfmenge V_P gilt analog zur obigen Betrachtung.

$$u_{MZ}^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{V_{MZ}}{V_P} \right)^2 \quad (7)$$

Wegen der hohen Impulswertigkeit des Masterzählers, z.B. $I = 1000 \text{ Imp./l}$ oder 1 kHz , ist der Varianzbeitrag von der Prüfmenge abhängig. Wird bei allen Kalibrierungen die Prüfmenge so gewählt, dass die Prüfzeit immer mindestens $0,1 \text{ h} = 360 \text{ s}$, aber zumindest 5 l beträgt, ergeben sich für Q_n und Q_{min} :

- ☛ Q_n : bei einer Prüfzeit von $\tau_p = 360 \text{ s}$ und daher einer Prüfmenge von $V_P = 150 \text{ l}$ für $u_{MZ}^2 = 1,48 \cdot 10^{-11}$
- ☛ Q_{min} : bei einer Prüfzeit von $\tau_p = 360 \text{ s}$ ergibt sich eine Prüfmenge von $V_P = 1,5 \text{ l}$, wegen der obigen Bedingung aber 5 l (entsprechend $\tau_p = 1200 \text{ s}$), woraus für den Varianzbeitrag folgt: $u_{MZ}^2 = 1,33 \cdot 10^{-8}$

Ein weiteres wichtiges genauigkeitsbestimmendes Element stellt die

Waage (Einfluss f_3)

dar. Die systematischen Meßabweichungen der Waagen wurde an ausgewählten Punkten ermittelt. Anschließend wird der Kurvenverlauf durch ein Polynom genähert. Die Standard-

unsicherheit wurde aus Wiederholmessungen ermittelt; die entsprechenden Werte sind der Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Empirisch ermittelte Standardunsicherheit u_W aus Wiederholmessungen der verwendeten Waagen. In u_W^{*2} wurde auch der Studentfaktor für $N = 6$ ($t = 2,65$ für $P = 95,45$ %) durch $u_W^{*2} = (t/2)^2 u_W^2$ berücksichtigt.

Waage 1	u_W	u_W^{*2}	Waage 2	u_W	u_W^{*2}	Waage 3	u_W	u_W^{*2}
Last in kg	in g	-	Last in kg	in g	-	Last in kg	in g	-
10	0,1	$1,76 \cdot 10^{-10}$	100	1,6	$4,49 \cdot 10^{-10}$	1000	28,9	$1,46 \cdot 10^{-9}$
30	0,5	$4,88 \cdot 10^{-10}$	200	2,7	$3,20 \cdot 10^{-10}$	2000	57,7	$1,46 \cdot 10^{-9}$
50	0,5	$1,76 \cdot 10^{-10}$	500	8	$4,49 \cdot 10^{-10}$	2900	57,5	$6,9 \cdot 10^{-10}$
100	0,1	$1,76 \cdot 10^{-12}$						

Werden die Werte der empirisch ermittelten Standardunsicherheiten mit dem halben Studentfaktor $t_{95,45}$ einer 2σ -Verteilung für $N = 6$ Wiederholmessungen multipliziert, dann erhält man für die korrigierte Varianz:⁴

$$u_w^{*2} = \left(\frac{t}{2}\right)^2 u_w^2 \quad (8)$$

Für die von uns gewählten Prüfpunkte erhält man demnach, wenn man die entsprechenden Werte aus Tabelle 1 interpoliert:

- ☛ Q_n und eine Prüfmenge $V_P = 150$ l: $u_W^{*2} = 3,85 \cdot 10^{-10}$,
- ☛ Q_{min} und einer Prüfmenge von $V_P = 5$ l zum Varianzbeitrag $u_W^{*2} = 1,76 \cdot 10^{-10}$.

Langzeitstabilität der Waage (Einfluss f_4)

Aus Nachkalibrierungen der Waagen kann, unter Zugrundelegung einer Rampenverteilung, ein Varianzbeitrag von:

$$u_{W,LZ}^2 = 5 \cdot 10^{-9} \quad (9)$$

⁴ Da der Studentfaktor für eine 2σ -Normalverteilung und einen Vertrauensbereich von $P = 95,45$ % nicht gleich ist dem doppelten Studentfaktor einer 1σ -Normalverteilung mit $P = 68,3$ %, ist zum Zweck der Messunsicherheitsermittlung folgendermaßen vorzugehen: Die Varianz wird zunächst für eine 1σ -Verteilung ermittelt. Liegen dabei weniger als 10 Wiederholmessungen vor, muss die Standardunsicherheit mit dem entsprechenden Studentfaktor multipliziert werden. Da aber nach Ermittlung der kombinierten Varianz der Schluß auf eine Überdeckungswahrscheinlichkeit von $P = 95,45$ % gemacht wird (i.a. $k = 2$), für die $t_{95,45}$ anzusetzen ist, ist bei der Berücksichtigung von Teilvarianzen statt $t_{68,3}$ der Faktor $t_{95,45}/2$ zu verwenden. Diese Vorgangsweise entfällt, wenn man die Methode des effektiven Freiheitsgrades ansetzt.

abgeleitet werden.⁵

Volumenermittlung durch Wägung, Auftriebskorrektur und Temperaturmessung (Einfluss f_5)

Aus dem Wäageergebnis erhält man das Sollvolumen V_w näherungsweise nach der Gl. (1b). Für die folgenden Abschätzungen wird der Quotient $\psi = V_w/m_N$ betrachtet, der von der Größenordnung 1 ist, wenn V_w in Liter und m_N in kg eingesetzt werden. Für die Dichte von Wasser ρ_w ist jene beim Druck von 1 bar einzusetzen, wofür die folgende Bestimmungsgleichung gilt:⁶

$$\rho_w = \frac{\sum_{n=0}^5 a_n t^n}{1 + b t}, \quad (10)$$

Die Koeffizienten a_n und b sind der Tabelle 3 zu entnehmen. Letztlich folgt daraus die Beziehung zwischen Wägewert und gesuchtem Volumen.

Die Größe ψ enthält die Temperaturabhängigkeit des Wäageergebnisses, ausgedrückt durch die Temperaturabhängigkeit der Dichte. Die Messunsicherheit der Temperatur u_t^2 wirkt sich über den Empfindlichkeitskoeffizienten $(\partial\psi/\partial t)$ auch auf die Dichte- und Auftriebsumrechnung aus. Die entsprechende Varianz lautet daher:

$$u_{D,A1}^2 = \left(\frac{\partial V(t)}{\partial t} \right)^2 u_t^2 \quad (11a)$$

Für eine Temperatur von 40 °C erhält man für den Empfindlichkeitskoeffizienten den Wert: $(1,509 \cdot 10^{-7})^{1/2}$. Für eine Unsicherheit der Temperaturmessung $\pm 0,2$ °C und bei Vorliegen einer Rechteckverteilung ergibt sich für die entsprechende Varianz:

$$u_{DA,1}^2 = 1,509 \cdot 10^{-7} u_t^2 = 2,01 \cdot 10^{-9} \quad (11b)$$

Die Dichte nach Gl. (10) gilt für destilliertes Wasser; für Leitungswasser, das bei den beschriebenen Prüfungen verwendet wird, ist die Dichte um etwa $1,5 \cdot 10^{-4}$ höher. Die Schwankung dieses Wertes beträgt etwa $5 \cdot 10^{-5}$. Der aktuelle Wert der Dichte wird von Zeit zu Zeit

⁵ In der Praxis tritt häufig folgendes Problem auf: Ein Messgerät wird zum Zeitpunkt $t_0 = 0$ kalibriert. Bei der Kalibrierung wird ein Schätzwert x_0 festgestellt. Nach einer Zeit t_1 erfolgt eine neuerliche Kalibrierung mit einem Schätzwert x_1 . Die Differenz aus dem Ergebnis der ersten und zweiten Kalibrierung ist $\Delta x = x_1 - x_0$. In diesem Fall erhält man für den Erwartungswert: $\langle E \rangle = \mu = \int_0^{t_1} k x dx = \dots = \frac{2}{3} x_1$ und für die Varianz: $\langle D^2 \rangle = \sigma^2 = \int_0^{t_1} k x x^2 dx - \frac{4}{9} x_1^2 = \dots = \frac{1}{18} x_1^2$

⁶ *H. Wagenbreth, W. Blanke*: Die Dichte des Wassers im Internationalen Einheitensystem und in der Internationalen Praktischen Temperaturskala von 1968, PTB-Mitteilungen Nr. 6/1971, S. 412 ff
H. Bettin, F. Spieweck: Die Dichte des Wassers als Funktion der Temperatur nach Einführung der Internationalen Temperaturskala von 1990, PTB-Mitteilungen Nr. 3/1990, S. 195 ff

bei einer vorgegebenen Temperatur (z.B. 40 °C) bestimmt; als Unsicherheit bleibt daher nur noch die angegebene Schwankung von $5 \cdot 10^{-5}$ übrig. Unter Annahme einer Rechteckverteilung wird daher der entsprechende Varianzbeitrag lauten:

$$u_{DA,2}^2 = 8,3 \cdot 10^{-10} \quad (12)$$

Tabelle 3: Werte der Koeffizienten in Gl. (10)

n	a_n	b
0	$9,9983952 \cdot 10^2$	$1,6887236 \cdot 10^{-2}$
1	$1,6952577 \cdot 10^1$	
2	$-7,9905127 \cdot 10^{-3}$	
3	$-4,6241757 \cdot 10^{-5}$	
4	$1,0584601 \cdot 10^{-7}$	
5	$-2,8103006 \cdot 10^{-10}$	

Temperaturänderung des Rohrleitungssystems (Einfluss f_6)

Durch geringe Durchflüsse entstehen zwischen dem/den Prüfling/en und dem Masterzähler bzw. dem Volumennormal Temperaturunterschiede. Aufgrund unterschiedlicher Ausdehnungskoeffizienten von Metallen und Wasser entsteht somit ein Volumenfehler von der Größenordnung:

$$\frac{\Delta V_R}{V_P} = \Delta\beta \Delta t \frac{V_R}{V_P} \quad (13)$$

In dieser Gleichung bedeuten

V_R ... Rohrvolumen

V_P ... Prüfvolumen

$\Delta\beta$... Differenz der räumlichen Ausdehnungskoeffizienten des Rohrleitungsmaterials (V4A-Stahl) und des Wärmeträgers (Wasser)⁷

Δt ... Rohrleitungsabkühlung

Setzt man die Werte für die Ausdehnungskoeffizienten von Wasser und Stahl ein, so erhält man unter Annahme einer Rechteckverteilung:

$$u_{TA}^2 = \frac{2,42 \cdot 10^{-7}}{3} \Delta t^2 \left(\frac{V_R}{V_P} \right)^2 \quad (14)$$

⁷ Ausdehnung des Wassers: $V_w(\Delta t) = V_w(t_0) (1 + \beta_w \Delta t)$; Ausdehnung des Rohrvolumens:

$V_R(\Delta t) = V_R(t_0) (1 + \alpha_{St}^3 \Delta t) \rightarrow \Delta V(\Delta t) = \Delta V_w(\Delta t) - \Delta V_R(\Delta t) = (\alpha_{St}^3 - \beta_w) \Delta t = \Delta\beta \Delta t$

Für ein Rohrvolumen von $V_R = 5$ l zwischen Prüfling und Masterzähler, ein Prüfvolumen bei Q_{min} von $V_P = 5$ l und eine Temperaturänderung von 5 K, erhält man für den Varianzbeitrag bei Rechteckverteilung:

☛ $Q_{min}: u_R^2 = 2 \cdot 10^{-6}$

☛ Der entsprechende Wert für Q_n lautet bei $\Delta t = 1$ K: $Q_n: u_R^2 = 2 \cdot 10^{-10}$

Wird die - natürliche - Abkühlung längs der Rohrleitung (und auch der/des Zähler/s) durch Begleitheizung reduziert, erreicht man bei Q_{min} : $\Delta t \leq 0,5$ K bzw. 0,1 K bei Q_n und damit für die entsprechenden Varianzen:

☛ $Q_{min}: u_R^2 = 2 \cdot 10^{-8}$

☛ Der entsprechende Wert für Q_n lautet bei $\Delta t = 1$ K: $Q_n: u_R^2 = 2 \cdot 10^{-12}$

Bekannt sind bei der gegenständlichen Prüfeinrichtung die Temperaturen am Eingang- und Ausgang der Prüfstrecke sowie beim gewählten Masterzähler. Tatsächlich sitzt aber der Prüfling irgendwo in der Prüfstrecke zwischen Eingang- und Ausgang. Es ergeben sich daher die folgenden Fragen:

- (1) Von welchen Größen hängt die Abkühlung der Prüfstrecke ab, im Besonderen: Wie wirkt sich die Strömungsgeschwindigkeit bzw. der Durchfluss im Rohr auf die Abkühlung aus?
- (2) Wie wird die tatsächliche Temperatur des Wärmeträgers im Prüfling aus den bekannten Temperaturen am Ein- und Ausgang der Prüfstrecke ermittelt?

zu (1): Wir wollen vorerst die Abkühlung der Rohrstrecke abschätzen, wozu wir die Abb. 4 betrachten.

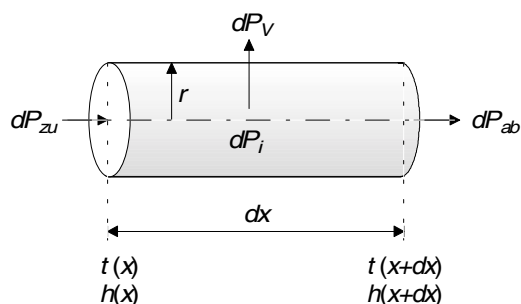


Abb. 4: Zur Berechnung der Abkühlung der Rohrstrecke

Bildet man für das dort dargestellte Rohrstück der Länge dx die Wärmestrombilanz, dann findet man die folgende Gleichungskette:

$$dP_{zu} - dP_{ab} = dP_v + dP_i = k dA (t - t_L) + c_v dm \frac{dt}{d\tau} \quad (15)$$

mit $dP_v = 2\pi r k (t - t_L) dx$ (16)

als dem Verlustwärmestrom, der vom Rohr zur Umgebung mit der Temperatur t_L abfließt und dem letzten Term in Gl. (15), der die Erhöhung der im Volumenelement $dV = dm/\rho$ gespeicherten Energie durch den zufließenden Wärmestrom darstellt. Im stationären Zustand, den man für unsere Verhältnisse annehmen kann, ist $dt/d\tau = 0$, wofür aus Gl. (15) folgt, dass

$$dP_{zu} - dP_{ab} = dP_v + dP_i \approx k dA (t - t_L) \quad (17)$$

Die Verlustwärmeleistung wird also aus der Differenz der zu- und abfließenden Wärmeströme gedeckt. Mit der spezifischen Enthalpie $h(x) = c_p t(x) \dot{m}$ und $c_p \approx \text{const.}$ folgt aus Gl. (17) weiter:

$$dP_{zu} - dP_{ab} = h(x) - h(x + dx) = c_p \dot{m} [t(x) - t(x + dx)] = -c_p \rho \dot{V} \frac{dt}{dx} dx = k 2\pi r (t - t_L) dx$$

Dies führt auf die Differentialgleichung:

$$\frac{dt}{dx} + \frac{2\pi r k}{c_p \rho \dot{V}} (t - t_L) = 0 \quad \text{oder} \quad \frac{dt}{dx} + \frac{C_1}{\dot{V}} (t - t_L) = 0 \quad \text{mit} \quad C_1 = \frac{2\pi r k}{c_p \rho} \quad (18)$$

Setzt man $\Theta = t - t_L$, wobei die Umgebungstemperatur t_L als konstant angenommen werden kann, erhält man mit $dt/dx = d\Theta/dx$ die Bestimmungsgleichung für den Temperaturverlauf im Rohr:

$$\frac{d\Theta}{dx} + \frac{C_1}{\dot{V}} \Theta = 0 \quad (19)$$

Die Integration liefert mit der Randbedingung: $x = 0 \rightarrow \Theta = \Theta_e$: $\frac{\Theta}{\Theta_e} = e^{-\frac{C_1}{\dot{V}} x}$ (20)

Der Temperaturverlauf des Wassers im Rohr wird durch die Größe C_1 (siehe Gl. (18)), die Wärmedurchgangszahl des Rohres k sowie den Durchfluss $Q = \dot{V}$ bestimmt. Die Wärmedurchgangszahl des Rohres ist durch die Gleichung:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_a} + \frac{1}{\alpha_i} + \sum_i \frac{\delta_i}{\lambda_i} \quad (21)$$

bestimmt, wenn α_a die äußere, α_i die innere Wärmeübergangszahl sowie δ_i die Rohrwandstärke der i -ten Schicht ist und λ deren Wärmeleitfähigkeit ($i = 1$ ist beispielsweise das Rohr selbst, 2 die Isolierung, wenn vorhanden).

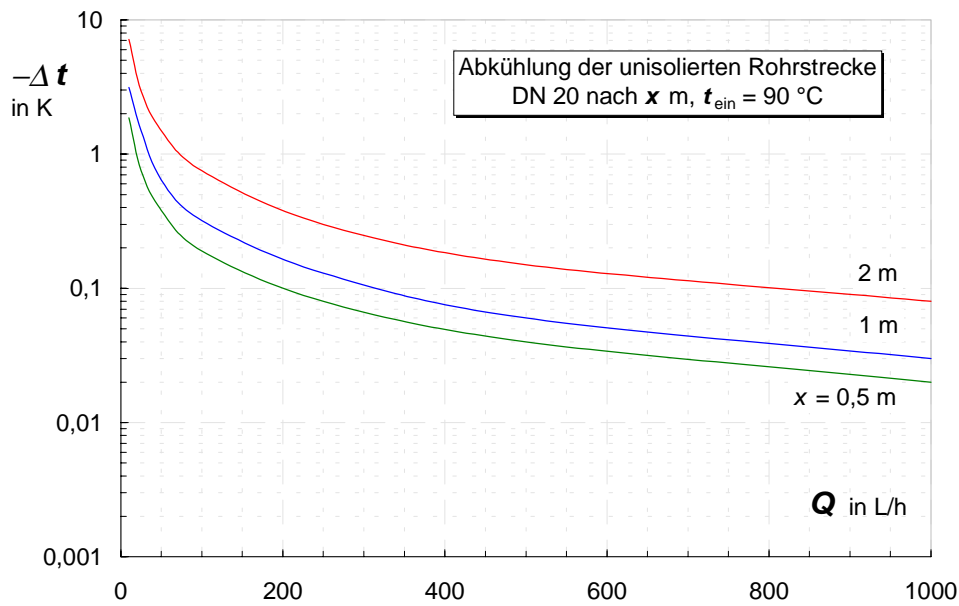


Abb. 5: Abkühlung eines unisolierten Rohres DN 20, in Abhängigkeit vom Abstand x von der Eintrittsstelle und vom Durchfluss

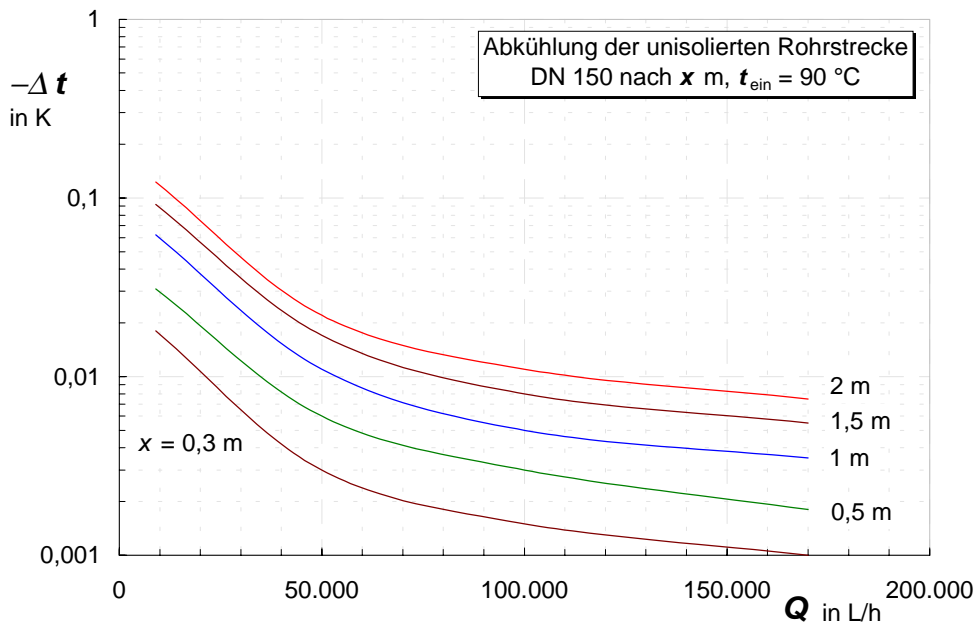


Abb. 6: wie Abb. 5, nur DN 150

Dabei wurde außerdem vorausgesetzt, daß die zugeordneten Rohrrinnen- sowie -außenflächen annähernd gleich sind, was für Rohrwandstärken $\delta \ll 2r$ (Rohraußenradius) stets erfüllt ist. Da die innere Wärmeübergangszahl von Wasser auf Stahl zwar abhängig vom Durchfluss, betragsmäßig aber stets größer als $1000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ist, die äußere dagegen $< 10\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, der Wärmeleitfähigkeitsterm (λ/δ) ebenfalls von der Größenordnung $> 10^4$, ist die Wärmedurch-

gangszahl k praktisch nur von der äußeren Wärmeübergangszahl abhängig. Nimmt man für diese einen Wert von $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ an,⁸ kann man die Abkühlung des Rohres in Abhängigkeit von der Länge berechnen. In Abb. 5 ist dies für ein Rohr DN 20, in Abb. 6 für ein Rohr DN 150 gezeigt.

Bei Vergleich der beiden Abbildungen fällt vor allem die stark unterschiedliche Abkühlung der beiden Rohrdimensionen auf. Während also bei geringen Rohrdimensionen eine Begleitheizung wichtig erscheint, kann diese bei großen Rohrdimensionen unterbleiben, was auch im konkreten Fall realisiert ist. Durch die Begleitheizung ist sichergestellt, dass längs des Zählers lediglich eine Abkühlung auftreten kann, die der Länge des Zählers entspricht.

zu (2): Da wir als Ergebnis erhielten, dass die Abkühlung der Prüfstrecke lediglich bei kleinen Rohrdurchmessern von merkbarer Größe ist, kann bei Verwendung von Doppelmantelrohren, bzw. begleitgeheizten Einspannstücken die Temperatur des Prüflings gleich der Eingangstemperatur der Prüfstrecke gesetzt werden.

Luft in Rohrleitungen (Einfluss f_7)

Luft stellt bei Durchflussmessungen ein besonderes Problem dar, da Durchflusssensoren/Wasserzähler in irgendeiner Form auch die Luft registrieren. Dazu wurde das Verhalten verschiedener Durchflusssensoren mit Luft-Volumenanteilen von 10 % bzw. 50 % untersucht. Die Ergebnisse sind in Abb. 6 gezeigt. Wenn auch der Volumenanteil von Luft nicht exakt erfasst wird, so zeigt doch jeder Zähler eine mehr oder weniger große Abweichung vom Sollwert (Volumenanteil des Wassers - ohne Luft).

Im Zusammenhang mit der Messunsicherheitsermittlung können mehrere Effekte beobachtet werden, die auf die Anwesenheit von Luft in messtechnisch relevanten Teilen des Prüfstandes zurückzuführen sind.

- (1) Wird Luft im Wasser mitgeführt, so wird ein bestimmter Luftanteil V_L auch registriert. Damit ergibt sich für die Varianz:

$$u_L^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{V_L}{V_P} \right)^2 \quad (22)$$

- (2) Befindet sich Luft in prüftechnisch relevanten Rohrteilen, beispielsweise in toten Ecken, Ventilen, nicht vollständig entlüfteten Prüflingen, so können sich Druckänderungen aufgrund der Kompressibilität der Luft störend auswirken. Solche Druckänderungen treten vor allem beim asymmetrischen An- und Abfahren im **Start-Stoppbetrieb** auf. Nimmt man Luft als ideales Gas an, dann ergibt sich für die entsprechende Varianz:

⁸ Die Bestimmung der Wärmedurchgangszahl kann in einem wohldefinierten Rohrstück durch Messung der Eingangs- und Ausgangstemperaturen bei definierten Durchflüssen bestimmt werden. Es ergeben sich Wärmedurchgangszahlen von der oben angegebenen Größenordnung (je nach Durchfluss zwischen 8 und $12 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)

$$u_{L1}^2 = \frac{1}{3} \frac{\left[V_L \left(1 - \frac{p_1}{p_2} \right) \right]^2}{V_P^2} \quad (23)$$

Für das Volumen der Luftblase $V_L = 100$ ml und einen Druckunterschied von 6 % erhält man speziell für Q_n und Q_{min} :

* Q_n und ein Prüfvolumen von $V_P = 100$ l: $u_{L1}^2 = 1,2 \cdot 10^{-9}$.

* Q_{min} und ein Prüfvolumen von $V_P = 5$ l: $u_{L1}^2 = 4,8 \cdot 10^{-7}$.

(3) Erfährt Luft in relevanten Rohrleitungsteilen eine Temperaturänderung, so ergibt sich aus dem Boyle-Mariotteschen Gesetz ebenfalls ein Fehlvolumen

$$\Delta V_L = \frac{1}{273} \Delta t V_L, \quad (24)$$

woraus für die entsprechende Varianz folgt: $u_{L2}^2 = \frac{1}{3} 1,34 \cdot 10^{-5} \Delta t^2 \left(\frac{V_L}{V_P} \right)^2$ (25)

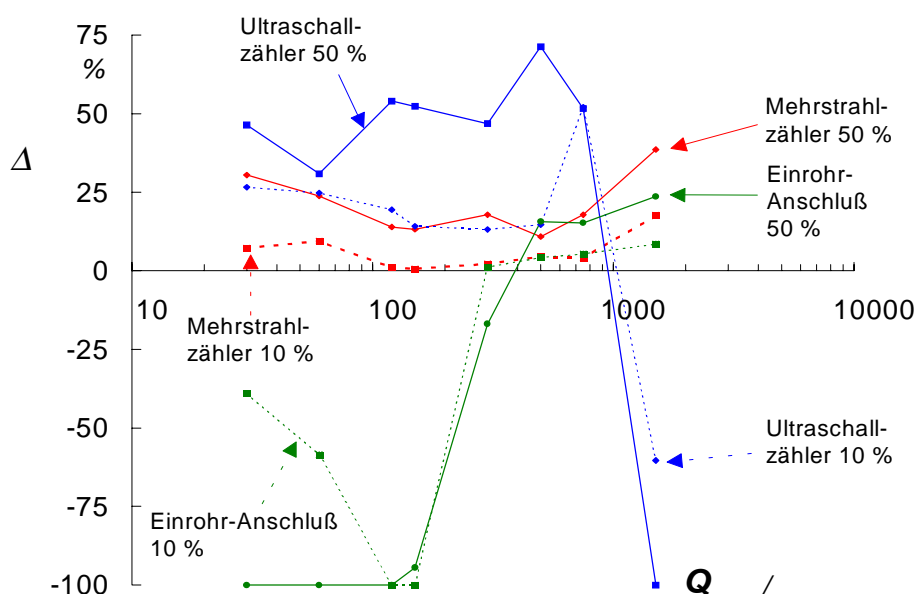


Abb. 7: Experimentell ermittelter Einfluss des im Wasser gelösten Luftanteiles (in Volumenprozent) auf das Registrierverhalten von Wasserzählern. Als Referenz wird das reine Flüssigkeitsvolumen herangezogen. Q ist der Volumendurchfluss

* Für Q_n , ein Prüfvolumen von $V_P = 100$ l und die Abkühlung der Luftblase von 5 K, ergibt sich für ein Luftvolumen von 0,3 l: $u_{L2}^2 = 1 \cdot 10^{-9}$,

- * Q_{min} und ein Prüfvolumen von $V_P = 5$ l und die Abkühlung der Luftblase von 5 K, ergibt sich für ein Luftvolumen von 0,3 l: $u_{L2}^2 = 4 \cdot 10^{-7}$.

Umschaltvorrichtung (Einfluss f_8)

Der Einfluss einer Umschaltvorrichtung ist durch das Verhältnis der Dauer des Umschaltvorganges zur eigentlichen Messzeit definiert. Er ist sehr stark von der gewählten Konstruktion abhängig. Mit üblichen Umschaltventilen erreicht man Differenzen in den Umschaltzeiten von 100 ms (siehe dazu Abb. 8). Diese Umschaltzeit, während der das Messgut in undefinierter Weise fließt, entspricht einem bestimmten Volumen ΔV_u , das bei Annahme einer Rechteckverteilung zu folgendem Varianzbeitrag führt:

$$u_u^2 = \frac{1}{3} \frac{\Delta V_u^2}{V_P^2}, \quad (26)$$

Es ergibt sich bei

- * Q_n und einem Prüfvolumen: $V_P = 100$ l, einer Schaltzeit von 100 ms ein "Umschaltvolumen" von $\frac{1}{2} \Delta V_u = 42$ ml. Mit Gl. (26) ergibt sich für die Varianz:

$$u_u^2 = \frac{1}{3} \frac{\Delta V_u^2}{V_P^2} = \frac{1}{3} \left(\frac{0,084}{100} \right)^2 = 2,4 \cdot 10^{-7}$$

- * Q_{min} und einem Prüfvolumen: $V_P = 5$ l, einer Schaltzeit von 100 ms ein "Umschaltvolumen" von $\frac{1}{2} \Delta V_u = 0,42$ ml. Analog ergibt sich für die Varianz:

$$u_u^2 = \frac{1}{3} \frac{\Delta V_u^2}{V_P^2} = \frac{1}{3} \left(\frac{0,00084}{5} \right)^2 = 9,4 \cdot 10^{-9}$$

Mit den derzeit besten Umschaltvorrichtungen, wie sie beim beschriebenen Prüfstand realisiert sind, wo lediglich der Flüssigkeitsstrahl umgelenkt wird, erreicht man Unsicherheiten in der Umschaltzeit für beide Vorgänge (Zu- und Wegschalten) von 10 ms (siehe dazu Tabelle 4). Für den Durchfluss von 1500 l/h entspricht dies einem Umschaltvolumen von $\Delta V_u \approx 4,2$ ml (analog für $Q_{min} = 15$ l/h: 320 μ l). Für die Varianz erhält man dann analog zu den obigen Ausführungen:

* bei Q_n : $u_u^2 = \frac{1}{3} \frac{\Delta V_u^2}{V_P^2} = \frac{1}{3} \left(\frac{0,0042}{100} \right)^2 = 5,9 \cdot 10^{-10}$

* bei Q_{min} : $u_u^2 = \frac{1}{3} \frac{\Delta V_u^2}{V_P^2} = \frac{1}{3} \left(\frac{4,2 \cdot 10^{-5}}{5} \right)^2 = 2,3 \cdot 10^{-11}$

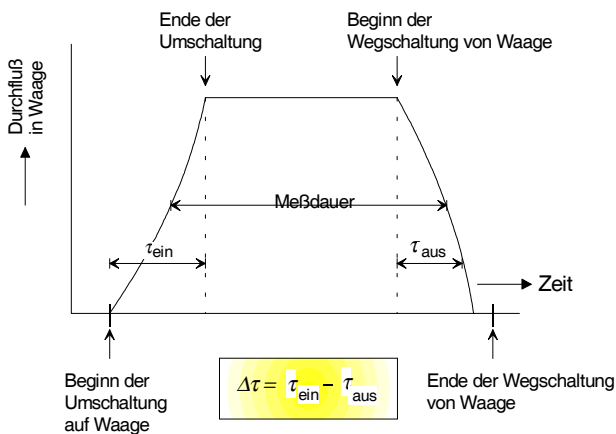


Abb. 8: Zur Definition der Umschalt-Differenzzeit $\Delta\tau$

Tabelle 4: Gemessene Umschaltzeiten der Diverter 1 und 2

<i>Kleiner Diverter</i>		<i>Großer Diverter</i>	
Q in L/h	$\Delta\tau$ in ms	Q in L/h	$\Delta\tau$ in ms
120	30,4	7500	10,7
240	-14,5	10000	11,8
500	-4,5	15000	11,6
1000	-2	20000	3,3
1500	-1,5	50000	1,7
2000	-1,9	100000	0,6
3000	-3,2	150000	-6,4

Feuchtigkeitsmessung (Einfluss f_9)

Durch Berücksichtigung der tatsächlichen Luftdichte und der Feuchtigkeitsverluste nach Gl. (3a) kann das tatsächliche Wasservolumen ermittelt werden. Tatsächlich liegen aber zwei Messgrößen nicht fehlerfrei vor und zwar die Temperatur, die aber bereits im Einfluss f_5 berücksichtigt wurde, und die Feuchtigkeit. Zur Abschätzung dieses Einflusses vereinfachen wir die Gl. (3a) mit folgenden Annahmen:

$$\left(1 - \frac{f_2}{\rho_w}\right) \approx 1; \left(1 - \frac{\rho_{L,u}}{\rho_N}\right) \approx 1; \left(1 - \frac{\rho_{L2}}{\rho_w}\right) \approx 1 \quad (27)$$

$$W_P = \Delta W - V_B (\rho_{L2} - \rho_{L1}) - V_B (f_2 - f_1) + m_V$$

Bildet man die Größe $u^2(W_P)$ zunächst ohne Berücksichtigung des Termes $u^2(m_V)$, dann erhält man:

$$u^2(W_P) = \left(\frac{\partial W_P}{\partial f_1}\right)^2 u^2(f_1) + \left(\frac{\partial W_P}{\partial f_2}\right)^2 u^2(f_2) + \left(\frac{\partial W_P}{\partial \rho_{L1}}\right)^2 u^2(\rho_{L1}) + \left(\frac{\partial W_P}{\partial \rho_{L2}}\right)^2 u^2(\rho_{L2}) = V_B^2 [2u^2(f) + 2u^2(\rho_{Li})]$$

und mit $u^2(\rho_{Li}) = \left(\frac{\partial \rho_{Li}}{\partial f_i}\right)^2 u^2(f_i)$ sowie ρ_{Li} aus der Beziehung:

$$\rho_{Li} = \frac{352,989}{T} - 1,608 \cdot 10^{-3} f_i + \frac{f_i}{1000} \text{ [g/m}^3\text{]}$$

folgt mit

$$u^2(f_1) = u^2(f_2) = u^2(f), u^2(\rho_{Li}) = 3,7 \cdot 10^{-7} u^2(f_i) \text{ und } u^2(W_P) = V_B^2 (2 + 7,4 \cdot 10^{-7}) u^2(f) \quad (28)$$

Jetzt fehlt nur noch die Bestimmung von $u^2(m_V)$. Aus den Gl. (3a) und (3b) folgt: $u^2(m_V) = V_P^2 u^2(f)$ und schließlich, indem man diesen Anteil zu Gl. (28) hinzufügt und auf W_P^2 bezieht:

$$\frac{u^2(W_P)}{W_P^2} \approx 2 \cdot 10^{-6} \left[2 \left(\frac{V_B}{V_P} \right)^2 + 1 \right] u^2(f) \quad (29)$$

Wegen des quadratischen Ausdruckes in der eckigen Klammer von Gl. (30) kann $u^2(W_P)$ für geringe Prüfmengen dominant werden. In der folgenden Tabelle 5 sind dazu einige Werte des Verhältnisses V_P/V_B berechnet. In der Praxis hat man daher stets Prüfmengen zu wählen, die annähernd dem Behältervolumen entsprechen.

Tabelle 5: $u^2(W_P) / W_P^2$ für verschiedene Verhältnisse V_P/V_B

V_P/V_B	$u^2(W_P) / W_P^2$
1	$1,3 \cdot 10^{-10}$
0,5	$3,8 \cdot 10^{-10}$
0,1	$8,4 \cdot 10^{-9}$
0,01	$8,4 \cdot 10^{-7}$

Masterzähler (Einfluss f_{10})

An Masterzähler sind hohe Anforderungen zu stellen, die sich, für den konkreten Fall, meist auf die Kurzzeitstabilität der Messabweichung in einem bestimmten Prüfpunkt reduzieren lassen. Dies setzt lediglich die Bestimmung der Messabweichung bei jedem Kalibrierpunkt (Q, t) voraus. Diese Voraussetzung muss aber spätestens dann fallengelassen werden, wenn der Prüfling

* ohne Wägung mit dem Masterzähler verglichen oder

* im Druckbetrieb kalibriert wird ($t \geq 100 \text{ }^\circ\text{C}$).

In beiden Fällen ist die Temperaturabhängigkeit der Fehlerkurve entscheidend. Der Messbereich kann durch die Bedingung festgelegt werden, dass die Messabweichungen gering sind und die Temperaturabhängigkeit möglichst verschwindet, aber zumindest konstant ist. Nach den Untersuchungen an den Masterzählern kann die Einhaltung dieser Bedingungen nicht immer garantiert werden. Eine wesentliche Voraussetzung bei der Verwendung von Magnetisch-induktiven Durchflusszählern (MID) als Masterzähler ist das Material der Rohrauskleidung. Während das sehr häufig verwendete Teflon eine berechenbare systematische Temperaturabhängigkeit ($dF/dt = -0,027 \text{ } \%. \text{K}^{-1}$) aufweist, fällt bei der Verwendung von Keramik als Rohrauskleidungsmaterial der Temperaturfehler kaum ins Gewicht. In Abb. 9 sind dazu als Beispiel für einen solchen Zähler die Fehlerkurven im Durchflussbereich von $1.000 \text{ L/h} \leq Q \leq 10.000 \text{ L/h}$ und bei Temperaturen von $40 \text{ }^\circ\text{C}$, $50 \text{ }^\circ\text{C}$ und $60 \text{ }^\circ\text{C}$ gezeigt.

Setzt man für den relevanten Masterzählers die Standardunsicherheit ($k = 1$) aus Wiederholmessungen mit $u_{W,MZ} \approx 0,05 \text{ } \%$ an, dann folgt daraus für die Varianz:

$$u_{W,MZ}^2 = 3 \cdot 10^{-7} \quad (30)$$

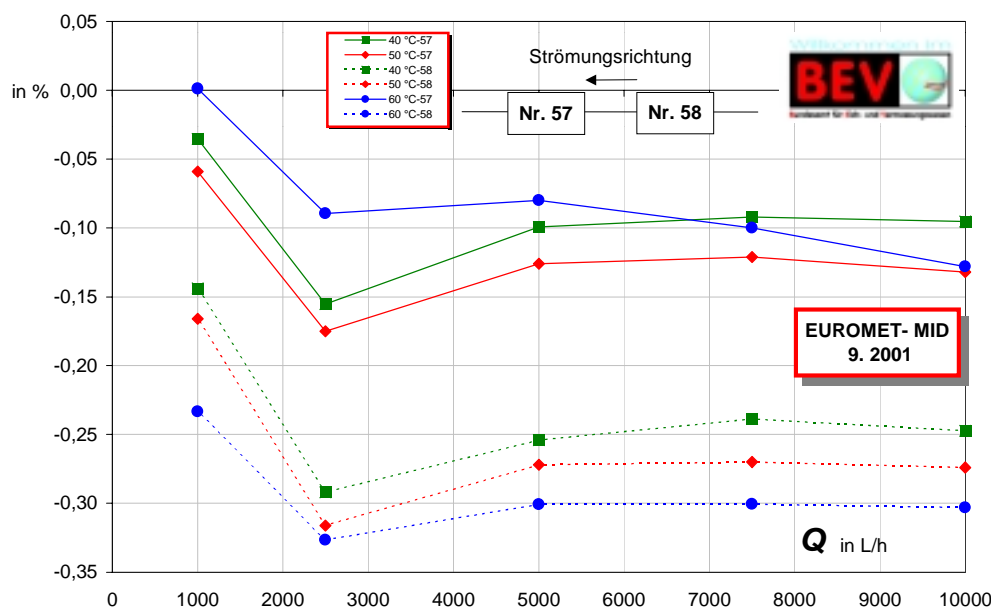


Abb. 9: Temperaturabhängigkeit zweier Masterzähler mit Keramikauskleidung. Diese Zähler wurden für einen Euromet-Vergleich, bei dem beide Zähler in Serie geschaltet werden, genauer untersucht

Wenn auch der Temperatureinfluss sehr gering ist, muss er in manchen Fällen (siehe 6) sehr genau analysiert werden (siehe dazu den Punkt: Abschließende Bemerkungen).

Einfluss von Durchflussschwankungen (Einfluss f_{11})

Üblicherweise schwankt der Durchfluss in einer Prüfeinrichtung mehr oder weniger stark um den vorgewählten Sollwert. Wird der gesamte Prüfdurchgang betrachtet, werden sehr viele Durchfluss-Zustände in der Umgebung des eingestellten Wertes eingenommen, die auch messtechnisch erfasst werden; das Messergebnis stellt somit eine Mittelwertbildung für den Durchfluss dar. Durch die Registrierung des momentanen Durchflusses lässt sich eine empirische Varianz $u^2(\Delta Q)$ ermitteln. Es erhebt sich nun die Frage, wie sich diese Durchflussschwankungen auf die systematischen Messabweichung eines Zählers auswirken!

Verläuft die Fehlerkurve in der *Umgebung* des Prüfpunktes Q_x linear, ist also ein Zusammenhang mit der Fehlerkurve durch einen Ansatz der Form:

$$\Delta F = K \Delta Q \quad (31)$$

möglich, so definiert der Mittelwert von Q_x einen bestimmten Punkt auf der Fehlerkurve F_x (siehe auch Abb. 10). Entscheidend ist, dass durch die Schwankungen des Durchflusses **keine** zusätzliche systematische Messabweichung auftritt.

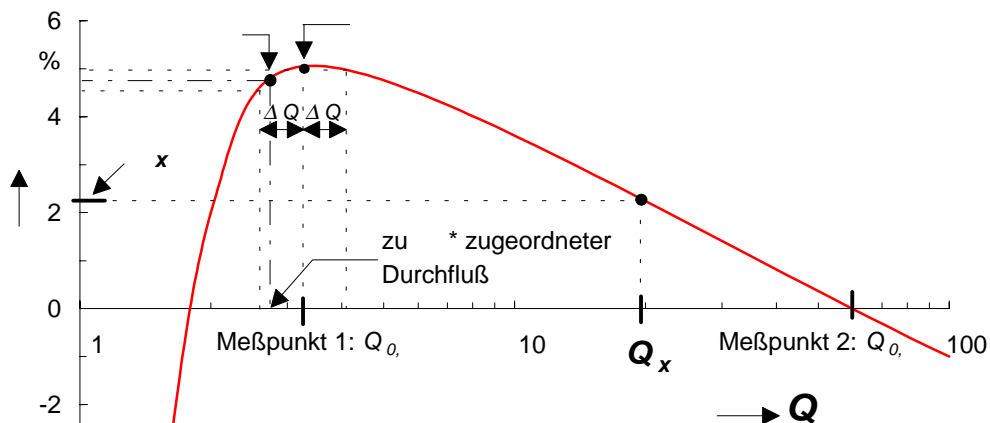


Abb. 10: Zusammenhang zwischen Durchflussänderung und Verlauf der Fehlerkurve

K kann empirisch ermittelt werden. Ändert sich z.B. die Fehlerkurve in einem Intervall von 400 l/h bis 800 l/h von +1 % auf -1 %, so ist $\Delta Q = 400$ l/h, $\Delta F = -2$ % und $K = -0,005$ [% h/L].

Ist der Zusammenhang zwischen der Durchflussänderung und der Fehleränderung jedoch nichtlinear, kann eine symmetrische Durchflussschwankung um $\pm \Delta Q$ eine asymmetrische Änderung der Fehlerkurve hervorrufen. In Abb. 11 ist dieser Fall für den Messpunkt 1 gezeigt. Die Durchflussschwankung $+\Delta Q$ ruft eine Änderung des mittleren Fehlers von ΔF_{1+} hervor, die Durchflussschwankung $-\Delta Q$ eine Fehleränderung von ΔF_{1-} . Die Absolutbeträge von ΔF_{1+} und ΔF_{1-} sind nicht identisch, woraus eine scheinbare Verschiebung der Fehlerkurve von F_j zu F_j^* erfolgt. Dieser Effekt kann im unteren Messbereich auftreten, im oberen Messbereich (Messpunkt 2) werden Durchflussschwankungen, wegen der i.a. flach verlaufenden Fehlerkurve, dagegen kaum zu nennenswerten Verschiebungen der Fehlerkurve führen.

Wir wollen diesen Effekt berücksichtigen, in dem wir für die Fehlerkurve eines Ansatz machen, der sich schon in vielen Fällen bewährt hat:

$$F(Q) = a_0 + a_1 Q + a_2 Q^2 + \frac{a_3}{Q} + \frac{a_4}{Q^2} \quad (32)$$

In Abb. 11 ist ein Beispiel für die Fehlerkurve eines Flügelradzählers gezeigt. Sie wird durch eine Ausgleichskurve mit dem Ansatz nach Gl. (32) beschrieben; die Koeffizienten (a_0, \dots, a_4) der Ausgleichskurve sind dort angegeben.

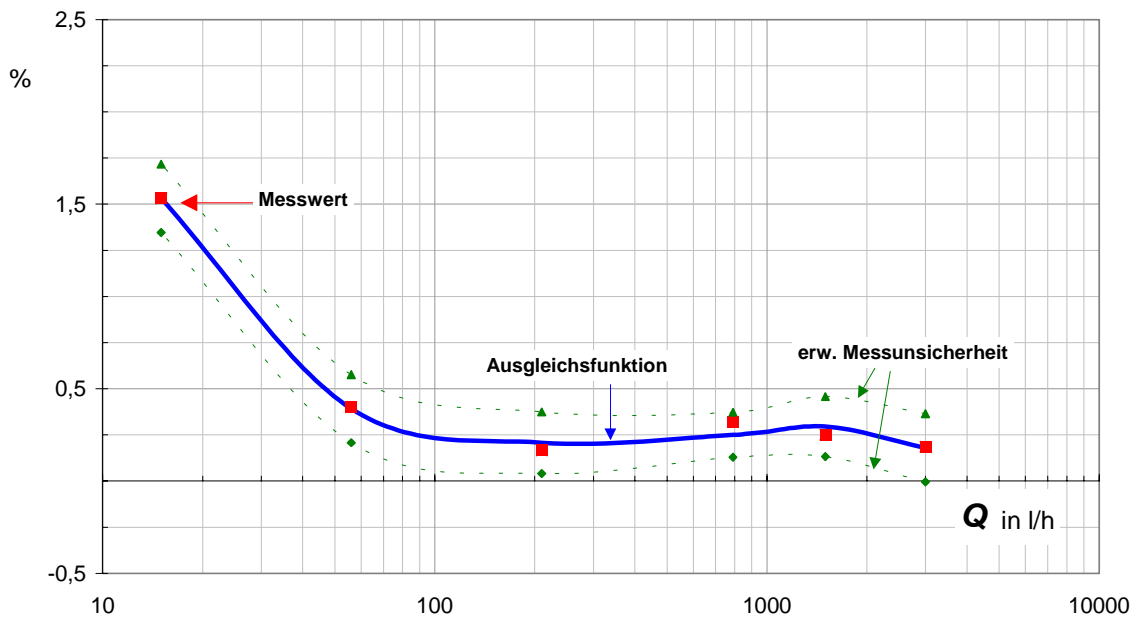


Abb. 11: Beispiel für die Fehlerkurve eines Durchflusssensors mit den folgenden charakterisierenden Koeffizienten der Ausgleichskurve: $a_0 = 9,323 \cdot 10^{-2}$ $a_1 = 2,295 \cdot 10^{-4}$ $a_2 = -6,741 \cdot 10^{-8}$ $a_3 = 14,00$ $a_4 = 112,9$

Für die entsprechende Varianz erhält man:

$$u^2(\Delta Q) = \left(\frac{\partial F}{\partial Q} \right)^2 u^2(Q) = \left[a_1 + 2 a_2 Q - \frac{a_3}{Q^2} - \frac{2 a_4}{Q^3} \right]^2 u^2(Q) \quad (33)$$

und ist damit für jeden Durchfluss berechenbar. Die Größe $u^2(Q)$ kann entweder aus dem Experiment durch laufende Überwachung bestimmt werden oder aus Grenzwertbetrachtungen wie beispielsweise: „Die Durchflussschwankung muss innerhalb der Grenzen $\pm 2\%$ liegen“. Im ersten Fall gilt:

$$u^2(\Delta Q) = \begin{cases} s^2 & \text{aus dem Experiment} \\ \frac{(\Delta Q)^2}{3} & \text{aus Grenzwertbetrachtungen} \end{cases} \quad (34)$$

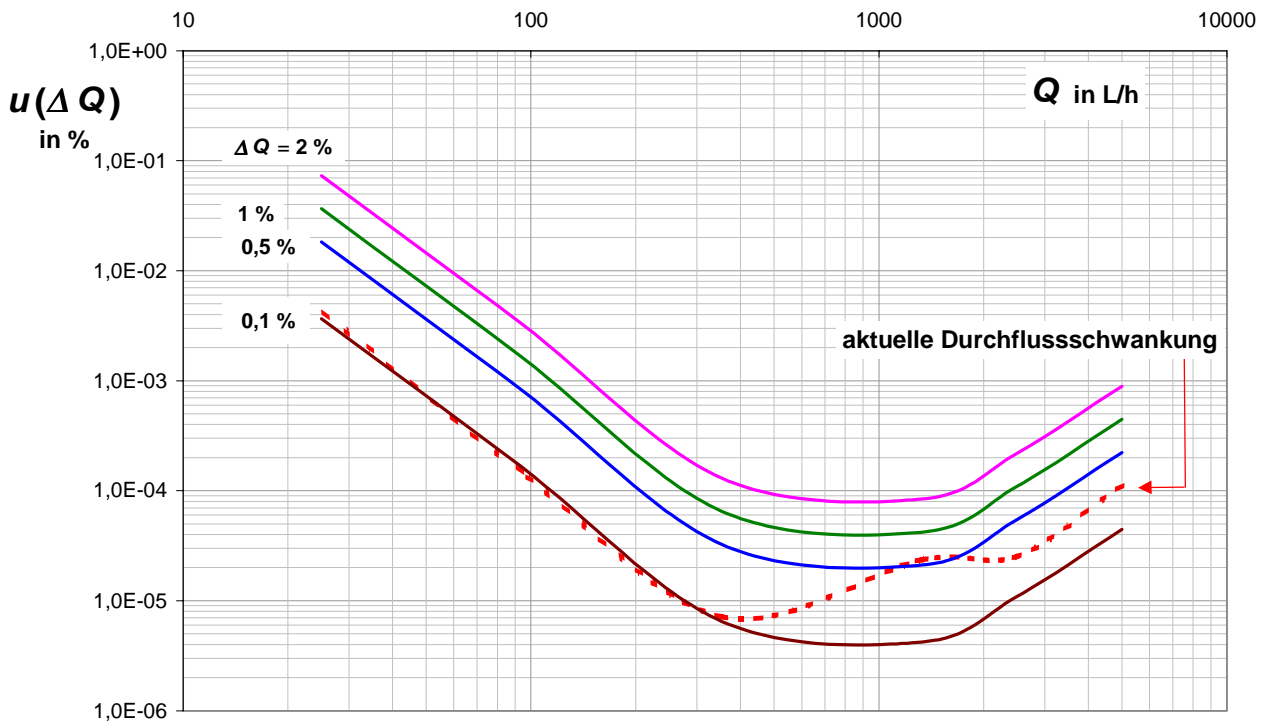


Abb. 12: Beispiel für den Einfluss der Nichtlinearität der Fehlerkurve eines Prüflings auf die Messunsicherheit

In Abb. 12 ist für den Prüflings nach Abb. 11 der Messunsicherheitsbeitrag $u(\Delta Q)$ für $\Delta Q = 2\%$, 1% , $0,5\%$, $0,1\%$ sowie für die aktuellen Werte des Prüfstandes gezeigt.

Der Einfluss der Durchflussschwankung auf die Messunsicherheit ist immer bei geringen Durchflüssen merkbar, vom Betrag her jedenfalls nur für $\Delta Q \geq 0,2\%$ merkbar. Wir werden ihn jedenfalls bei unseren Überlegungen berücksichtigen

Start-Stopp-Einfluss (Einfluss f_{12})

Wird die Kalibrierung im Start-Stopp-Betrieb ausgeführt, kann durch die zweimalige Änderung des Durchflusses von $0 \rightarrow Q \rightarrow 0$ ein systematischer Einfluss auftreten, der aus dem Durchlaufen der Fehlerkurve von $0 \rightarrow Q$ (bzw. umgekehrt) entsteht. Je nachdem, wie rasch der Sollthroughfluss erreicht wird und welches Stellorgan benützt wird, wird die Größe der systematischen Messabweichung variieren.

Tabelle 6: Unterschiede der gemittelten Messfehler bei Start-Stopp- und fliegendem Betrieb ($x_{0,ss} - x_{0,f}$) bei einem Durchfluss von 1500 L/h, aber unterschiedlichen Kalibriervolumina, bestimmt mittels eines Flügelradzählers mit induktiver Abtastung (Impulswertigkeit: 25 Imp./L). $u_{ss,f}$ ist der Unterschied in den Standardunsicherheiten zwischen Start-Stopp- und fliegendem Betrieb

Q [L/h]	V [L]	$x_{0,ss} - x_{0,f}$	$\Delta u_{ss,f}$
1500	50	0,13	0,033
1500	100	0,16	0,028
1500	200	0,09	0,006
1500	500	0,08	0,002
1500	1000	0,08	0,005

Dieser Effekt konnte bei Q_n zu ca. -0,1 % bestimmt werden. Bei Q_{min} spielt er, wegen der wesentlich längeren Prüfzeit, kaum eine Rolle. Wir verwenden den ermittelten Wert für Q_n , woraus ein Varianzbeitrag von folgender Grösse folgt:

$$u_{SS}^2 = \frac{1}{3} 10^{-6} = 3,3 \cdot 10^{-7} \quad (35)$$

Wie man der Tabelle 6 entnimmt, werden die Unterschiede zwischen Start-Stopp- und fliegendem Betrieb mit zunehmendem Prüfvolumen immer kleiner. Nimmt man den Unterschied zwischen beiden Betriebszuständen mit etwa 0,1 % an, dann läßt sich daraus eine Varianzbeitrag von folgender Grösse ableiten:

$$u_{SS}^2 = \frac{1}{3} 10^{-6} = 3,3 \cdot 10^{-7} \quad (36)$$

Druckabhängigkeit (Einfluss f_{13})

Aus Vergleichsmessungen zwischen Versorgung der Prüfstrecke mit Pumpe bzw. Hochbehälter konnten systematische Unterschiede bestimmt werden, die in der folgenden Abb. 13 für einen Prüfling dargestellt sind.

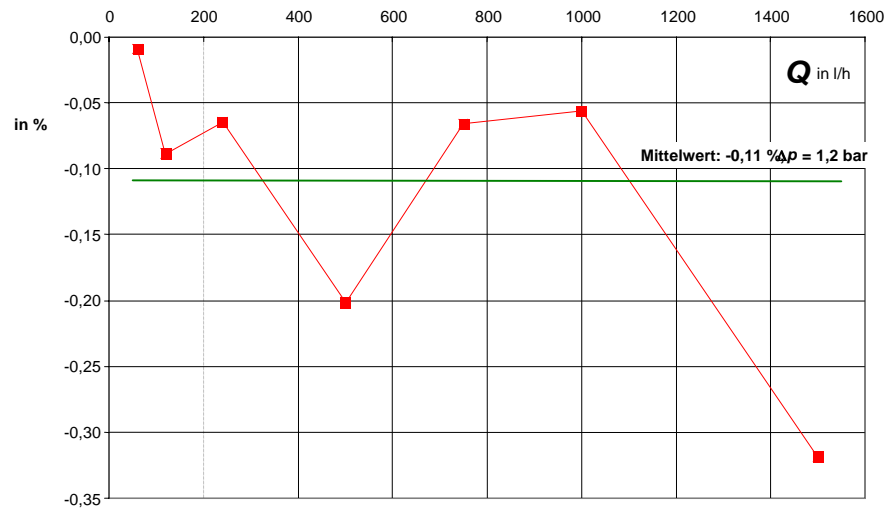


Abb. 13: Druckabhängigkeit der Anzeigecharakteristik eines Mehrstrahl-Flügelradzählers

Dieser Effekt kann nicht als Messunsicherheitsbeitrag interpretiert werden, muss aber bei allen Kalibrierungen berücksichtigt werden. Er zeigt jedenfalls, dass der Druck als Einflussgröße nicht zu vernachlässigen ist.

Zusammenfassung

Im Folgenden sind einige Prüfprozesse hinsichtlich ihrer Messunsicherheit analysiert worden. Für die erweiterte Messunsicherheit U ergeben sich unterschiedliche Werte, je nach Betriebszustand der Anlage. Ausgewählt wurde ein Flügelradzähler, dessen Messunsicherheit bei einer Temperatur von 40 °C und 90 °C berechnet wurde.

Tabelle 7: Erweiterte Messunsicherheit für einen Flügelradzähler $Q_n 1,5$. In (a) ist eine Temperatur des Wärmeträgers von 40 °C, in (b) eine solche von 90 °C angenommen. Die Wiederholbarkeit des Prüflings wurde im Experiment bestimmt und findet sich im ersten Teil der Tabelle (Zeile 12). Der erste Block (Zeile 1 bis 17) enthält Werte, die vorgegeben werden müssen. Der zweite Block (Zeile 18 bis 30) zeigt Berechnungen, die auf Grund der Vorgaben im ersten Block ausgeführt werden. Im dritten Block (Zeile 31 bis 35) werden die Berechnungen zur Ermittlung der Erweiterten Messunsicherheit einschließlich des Prüflings vorgenommen, im vierten Block schließlich Berechnungen zur Bestimmung der Messunsicherheit der Messanlage, in dem die zählerspezifischen Varianzanteile wie Auflösung und Wiederholbarkeit vernachlässigt werden (Zeile 36 bis 40).

(a) Wassertemperatur: 40 °C

Fliegender Betrieb mit Waage; Zählerimpulse synchronisiert							
Q_n in m ³ /h		1,5					
Wassertemperatur [°C]		40					
Umgebungstemperatur [°C]		25					
Luftdruck [mbar]:		1.000					
Durchfluss [l/h]		3000	1500	790	210	56	15
1 Prüfvolumen V_P [L]		300	150	100	50	20	10
2 ausgewählte Waage		600	600	140	140	140	140
3 Prüfzeit [s]		360	360	456	857	1286	2400
4 Ausgangsimpulse des Prüflings [Impulse/L]		1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
5 Ausgangsimpulse des Masterzählers [Impulse/L]		100	1000	1000	1000	10000	10000
6 Wiederholbarkeit des Prüflings $u(x_i)$ [%]		0,040	0,032	0,057	0,060	0,191	0,445
7 Rohrvolumen zwischen Prüfling und Masterzähler [L]		56	56	56	56	56	56
8 Luftanteil im Wasser [L]		0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
9 Abkühlung der Luftblase [K]		5	5	5	5	5	5
10 Messunsicherheit der Temperatur für die Dichte- und Auftriebskorrektur [K]		0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
11 Temperaturunterschied zwischen Prüfling und Masterzähler [°C]		0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
12 Zahl der Wiederholmessungen		5	5	5	5	5	5
13 absolute Luftfeuchte [g/m ³] bei der Temperatur des Wassers		51,1	51,1	51,1	51,1	51,1	51,1
14 absolute Luftfeuchte [g/m ³] bei Umgebungstemperatur		23,1	23,1	23,1	23,1	23,1	23,1
15 Verdampfungs-Luftstrom [g]		8	4	3	1	1	0
16 Umschaltzeit des Diverters [ms]		-3,2	-1,5	-3,3	-14,5	10,0	10,0
17 Schwankung des Durchflusses in %		0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
18 Auflösung des Prüflings: u_A		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19 Auflösung des Masterzählers: u_{MZ}^2		3,70E-10	1,48E-11	3,33E-11	1,33E-10	8,33E-12	3,33E-11
20 Waage u_w^2		2,80E-10	2,80E-10	2,80E-10	2,80E-10	2,80E-10	2,80E-10
21 Langzeitstabilität der Waage: u_{wLT}^2		5,00E-09	5,00E-09	5,00E-09	5,00E-09	5,00E-09	5,00E-09
22 Dichte und Auftriebskorrektur 1: temperature $u_{D,A1}^2$		1,51E-09	1,51E-09	1,51E-09	1,51E-09	1,51E-09	1,51E-09
23 Dichte und Auftriebskorrektur 2: density $u_{D,A2}^2$		4,10E-10	4,10E-10	4,10E-10	4,10E-10	4,10E-10	4,10E-10
24 Temperaturabfall zwischen Prüfling und Masterzähler: u_{TA}^2		2,81E-11	1,12E-10	2,53E-10	1,01E-09	6,32E-09	2,53E-08
25 Gelöste Luft im Rohr (1): u_{L1}^2 (nur für Start-Stopp-Betrieb)		0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00
26 Gelöste Luft im Rohr (2): u_{L2}^2		1,12E-10	4,47E-10	1,01E-09	4,02E-09	2,51E-08	1,01E-07
27 Diverter: u_d^2		2,63E-11	5,79E-12	1,70E-11	9,54E-11	2,02E-11	5,79E-12
28 Feuchtigkeitseffekte: u_f^2		4,60E-11	2,30E-09	2,30E-09	2,30E-09	2,30E-09	2,30E-09
29 Nichtlinearität der Fehlerkurve $u^2(DQ)$		4,16E-14	5,85E-16	1,34E-14	2,64E-14	4,07E-11	2,21E-08
30 Wiederholbarkeit des Prüflings: $u(x_i)$		1,60E-07	1,02E-07	3,25E-07	3,60E-07	3,65E-06	1,98E-05
31 Kombinierte Varianz: u_c^2		1,68E-07	1,12E-07	3,36E-07	3,75E-07	3,69E-06	2,00E-05
32 Erweiterte Messunsicherheit U : [%] für $k = 2$		0,082	0,067	0, 6	0, 22	0,38	0,89
33 v_{eff}		9,86	10,76	9,60	9,74	9,20	9,14
34 k_{eff}		2,31	2,27	2,32	2,31	2,34	2,35
35 Erweiterte Messunsicherheit U_{eff} [%]		0,095	0,076	0, 35	0, 42	0, 50	,0 9
36 Kombinierte Varianz: u_c^2 ohne Wiederholbarkeit des Prüflings		7,78E-09	1,01E-08	1,08E-08	1,48E-08	4,10E-08	1,35E-07
37 Erweiterte Messunsicherheit U [%] für $k = 2$		0,0 8	0,020	0,02	0,024	0,0 0	0,0
38 v_{eff}		6,57	11,00	12,26	14,62	7,21	5,10
39 k_{eff}		2,58	2,26	2,22	2,16	2,50	2,80
40 Erweiterte Messunsicherheit: U_{eff} ohne Wiederholbarkeit des Prüflings		0,023	0,023	0,023	0,026	0,05	0, 03

(b): Wassertemperatur: 90 °C

Fliegender Betrieb mit Waage; Zählerimpulse synchronisiert							
Q_n in m ³ /h		1,5					
Wassertemperatur [°C]		90					
Umgebungstemperatur [°C]		25					
Luftdruck [mbar]:		1.000					
Durchfluss [l/h]		3000	1500	790	210	56	15
1 Prüfvolumen V_P [L]		300	150	100	50	20	10
2 ausgewählte Waage		600	600	140	140	140	140
3 Prüfzeit [s]		360	360	456	857	1286	2400
4 Ausgangsimpulse des Prüflings [Impulse/L]		1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
5 Ausgangsimpulse des Masterzählers [Impulse/L]		100	1000	1000	1000	10000	10000
6 Wiederholbarkeit des Prüflings $u(x_i)$ [%]		0,040	0,032	0,057	0,060	0,191	0,445
7 Rohrvolumen zwischen Prüfling und Masterzähler [L]		56	56	56	56	56	56
8 Luftanteil im Wasser [L]		0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
9 Abkühlung der Luftblase [K]		5	5	5	5	5	5
10 Messunsicherheit der Temperatur für die Dichte- und Auftriebskorrektur [K]		0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
11 Temperaturunterschied zwischen Prüfling und Masterzähler [°C]		0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
12 Zahl der Wiederholmessungen		5	5	5	5	5	5
13 absolute Luftfeuchte [g/m ³] bei der Temperatur des Wassers		417,9	417,9	417,9	417,9	417,9	417,9
14 absolute Luftfeuchte [g/m ³] bei Umgebungstemperatur		23,1	23,1	23,1	23,1	23,1	23,1
15 Verdampfungs-Luftstrom [g]		118	59	39	20	8	4
16 Umschaltzeit des Diverters [ms]		-3,2	-1,5	-3,3	-14,5	10,0	10,0
17 Schwankung des Durchflusses in %		0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
18 Auflösung des Prüflings: u_A		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19 Auflösung des Masterzählers: u_{MZ}		3,70E-10	1,48E-11	3,33E-11	1,33E-10	8,33E-12	3,33E-11
20 Waage u_w		2,80E-10	2,80E-10	2,80E-10	2,80E-10	2,80E-10	2,80E-10
21 Langzeitstabilität der Waage: u_{wLT}		5,00E-09	5,00E-09	5,00E-09	5,00E-09	5,00E-09	5,00E-09
22 Dichte und Auftriebskorrektur 1: temperature $u_{D,A1}$		5,21E-09	5,21E-09	5,21E-09	5,21E-09	5,21E-09	5,21E-09
23 Dichte und Auftriebskorrektur 2: density $u_{D,A2}$		4,10E-10	4,10E-10	4,10E-10	4,10E-10	4,10E-10	4,10E-10
24 Temperaturabfall zwischen Prüfling und Masterzähler: u_{TA}		2,81E-11	1,12E-10	2,53E-10	1,01E-09	6,32E-09	2,53E-08
25 Gelöste Luft im Rohr (1): u_{L1} (nur für Start-Stopp-Betrieb)		0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00
26 Gelöste Luft im Rohr (2): u_{L2}		1,12E-10	4,47E-10	1,01E-09	4,02E-09	2,51E-08	1,01E-07
27 Diverter: u_d		2,63E-11	5,79E-12	1,70E-11	9,54E-11	2,02E-11	5,79E-12
28 Feuchtigkeitseffekte: u_f		3,76E-10	1,88E-08	1,88E-08	1,88E-08	1,88E-08	1,88E-08
29 Nichtlinearität der Fehlerkurve $u^2(DQ)$		4,16E-14	5,85E-16	1,34E-14	2,64E-14	4,07E-11	2,21E-08
30 Wiederholbarkeit des Prüflings: $u(x_i)$		1,60E-07	1,02E-07	3,25E-07	3,60E-07	3,65E-06	1,98E-05
31 Kombinierte Varianz: u_c		1,72E-07	1,33E-07	3,56E-07	3,95E-07	3,71E-06	2,00E-05
32 Erweiterte Messunsicherheit U : [%] für $k = 2$		0,083	0,073	0, 9	0, 26	0,385	0,89
33 v_{eff}		10,31	13,54	10,68	10,73	9,30	9,16
34 k_{eff}		2,29	2,19	2,27	2,27	2,34	2,35
35 Erweiterte Messunsicherheit U_{eff} [%]		0,095	0,080	0, 36	0, 43	0, 50	,0 9
36 Kombinierte Varianz: u_c ohne Wiederholbarkeit des Prüflings		1,18E-08	3,03E-08	3,10E-08	3,50E-08	6,12E-08	1,56E-07
37 Erweiterte Messunsicherheit U [%] für $k = 2$		0,022	0,035	0,035	0,037	0,0 9	0,0 9
38 v_{eff}		7,97	52,38	54,04	52,75	15,52	6,72
39 k_{eff}		2,43	2,02	2,02	2,02	2,15	2,56
40 Erweiterte Messunsicherheit: U_{eff} ohne Wiederholbarkeit des Prüflings		0,026	0,035	0,036	0,038	0,053	0, 0

4 Abschließende Bemerkungen

Bisher wurde über die Abschätzung der Messunsicherheit bei Wassertemperaturen bis 90 °C berichtet. Tatsächlich wurde aber auch zahlreiche Messungen im Druckbetrieb, d.h. bei Temperaturen größer als 100 °C ausgeführt. Es gab einige Probleme mit der Extrapolation der Fehlerkurven der Masterzähler für Temperaturen größer als 90 °C, die aber jetzt behoben sind. Ein Beispiel für eine Fehlerkurve eines Woltmanzähler für Wassertemperaturen über 100 °C zeigt die Abb. 14.

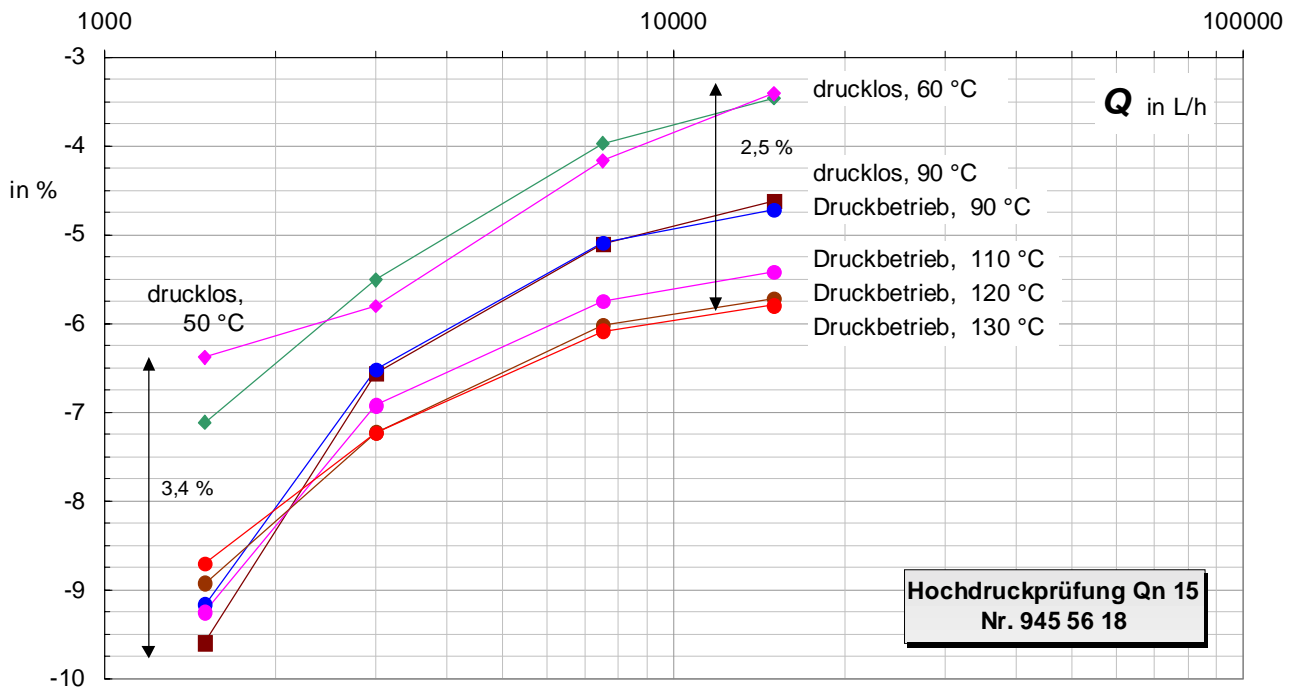


Abb. 14: Abhängigkeit der Messabweichungen eines Woltmanzählers (WP) bei Temperaturen über 100 °C