

Das Hydrodynamische Prüffeld der PTB zur Untersuchung von Durchflussmessgeräten

Rainer Engel

Fachlaboratorium für Flüssigkeitsmessgeräte
Physikalisch-Technische Bundesanstalt
D-38116 Braunschweig
rainer.engel@ptb.de

1 ALLGEMEINES

Die Messgrößen **Durchfluss** (Volumen- oder Massedurchfluss) und **Volumen** und **Masse von strömenden Flüssigkeiten** und deren exakte messtechnische Erfassung, sind in den verschiedensten Bereichen von Wissenschaft und Industrie von außerordentlicher Bedeutung. Gleichermaßen spielen sie auch in nichttechnischen Anwendungsbereichen, wie z. B. Medizin und Umwelttechnik, eine bedeutsame Rolle.

Gemäß dem Einheitengesetz hat die PTB die Aufgabe, die gesetzlichen Einheiten darzustellen, aufzubewahren und weiterzugeben. Basierend auf diesem gesetzlichen Auftrag wird das **Hydrodynamische Prüffeld** (nach vollständiger Inbetriebnahme) **das nationale Primärnormal** für die Messung und Darstellung der **Messgrößen Volumen- und Massedurchfluss** sowie **Volumen und Masse von strömendem Wasser** repräsentieren.

Aus dieser Zweckbestimmung resultiert als eine der wesentlichen Anforderungen an das Hydrodynamische Prüffeld, dass es eine **erweiterte Messunsicherheit von $\leq 0,02\%$** realisieren muss [9]:

Alle Komponenten des Hydrodynamischen Prüffeldes wurden in der Weise konzipiert und dimensioniert, dass es als Durchfluss-Normalmesseinrichtung diese wichtigste Zielstellung für die ausgewiesenen Durchflussmessbereiche erreicht bzw. einhält.

Diesen globalen Anforderungen entsprechend wurden alle funktionsrelevanten Komponenten des Hydrodynamischen Prüffeldes konzipiert und technisch realisiert.

2 DIE MESSGRÖSSE DURCHFLUSS

Generell repräsentiert die **Messgröße Durchfluss** das Verhältnis aus der Menge des strömenden Fluids (d.h. einer Flüssigkeit oder eines Gases) differenziert nach der Zeit. Entsprechend der jeweiligen Betrachtungsweise oder Anwendung unterscheidet man:

$$\text{Volumendurchfluss: } Q = q_v(t) = \dot{V}(t) = \frac{d[V(t)]}{dt} \quad (1)$$

Unter Berücksichtigung des durchströmten Leitungsquerschnittes A ergibt sich:

$$\dot{V}(t) = \int_0^A v(t) dA = A \cdot \bar{v}(t) \quad (2)$$

Wobei $v(t)$ die örtliche Strömungsgeschwindigkeit an einem beliebigen Ort auf dem durchströmten Leitungsquerschnitt A und $\bar{v}(t)$ die mittlere Strömungsgeschwindigkeit über den gesamten Leitungsquerschnitt darstellt.

Massedurchfluss:
$$q_m = \dot{m}(t) = \frac{d[m(t)]}{dt} \quad (3)$$

Beide Größen sind über die Dichte ρ des betreffenden Messmediums miteinander verknüpft:

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V} \quad (4)$$

Volumen- und Massezähler ermitteln durch Integration des zeitlichen Volumen- bzw. Massestromverlaufs das während einer Messzeit T_M durch das betreffende Messgerät hindurch geströmte Volumen V_M bzw. das entsprechende Masseäquivalent m_M des betreffenden Messmediums:

Volumen von strömenden Flüssigkeiten:

$$V_M = \int_0^{T_M} \dot{V}(t) dt = \bar{q}_v \cdot T_M \quad (5)$$

Masse von strömenden Flüssigkeiten:

$$m_M = \int_0^{T_M} \dot{m}(t) dt = \bar{q}_m \cdot T_M \quad (6)$$

Diese allgemeinen Zusammenhänge werden durch Bild 1 veranschaulicht.

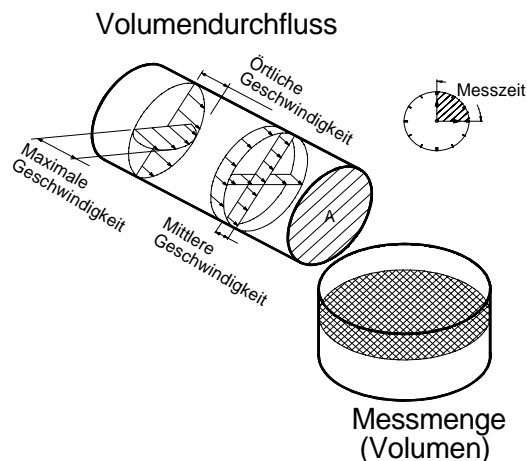


Bild 1 Volumendurchfluss und Volumen strömender Flüssigkeiten

In Abhängigkeit davon, welche der o.g. Messgrößen bei der Kalibrierung bestimmt werden soll, sind für Durchflusskalibriereinrichtungen entsprechende Betriebsarten vorzusehen.

Grundsätzlich muss man feststellen, dass die Messgrößen Volumendurchfluss und Massedurchfluss gemäß der Gleichungen (1) und (3) Differentialquotienten darstellen, praktisch ist es jedoch nur möglich, durch eine Messung den Differenzenquotienten für diese Messgrößen zu bestimmen:

mittlerer Volumendurchfluss:
$$\bar{q}_V = \frac{V_M}{T_M} \quad (7)$$

mittlerer Massedurchfluss:
$$\bar{q}_M = \frac{m_M}{T_M} \quad (8)$$

Da für eine entsprechende Messauflösung entsprechend große Messmengen und Messzeiten erforderlich sind, wird die Genauigkeit bei der Kalibrierung dieser Messgrößen durch die Stabilität des zeitlichen Verlaufs der Messgröße Durchfluss entscheidend mitbestimmt.

Um auch bei der Kalibrierung dieser Messgrößen hohen Anforderungen zu entsprechen, wurden im Hydrodynamischen Prüffeld geeignete konstruktive und funktionelle Maßnahmen getroffen, um den Durchfluss während einer Messung mit möglichst hoher Genauigkeit konstant zu halten. Zu diesen Maßnahmen gehören die Nutzung eines Hochbehälters mit einem Überlaufwehr und die Verwendung spezieller Strategien in der elektronischen Durchflussregeleinrichtung.

3 KALIBRIERVERFAHREN UND MESSTECHNISCHE ANFORDERUNGEN

3.1 Gravimetrische Durchfluss-Normalmesseinrichtung für Flüssigkeiten

Durchfluss-Normalmesseinrichtungen für Flüssigkeiten mit höchsten Anforderungen bezüglich der Messunsicherheiten basieren auf einer gravimetrischen Mengenbestimmung, d.h. die Mengenbestimmung wird durch Wägung realisiert.

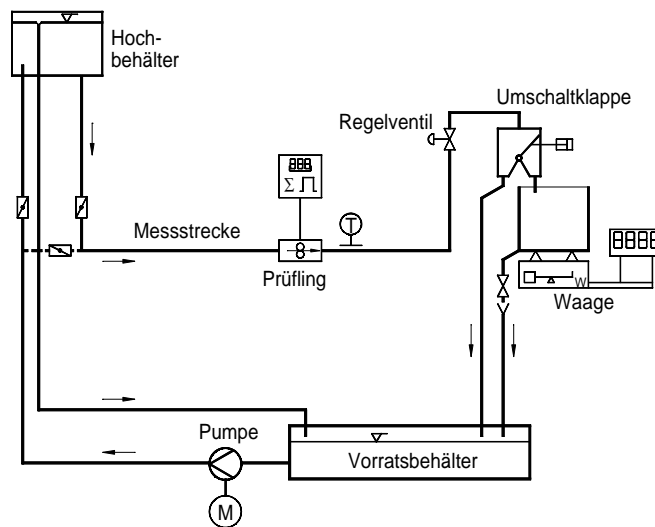


Bild 2 Gravimetrische Durchfluss-Normalmesseinrichtung (Turmbetrieb)

Eine **gravimetrische Normalmesseinrichtung** für die Durchflussmessung von Flüssigkeiten besteht, wie im Bild 1 dargestellt, im wesentlichen aus folgenden Hauptkomponenten [1]:

- Vorratsbehälter für das Prüfmedium
- drehzahlregelte Pumpe(n) zur Erzeugung eines definierten Durchflusses in den Hochbehälter
- Hochbehälter mit einem Überlaufwehr zur Druck- und damit Durchflussstabilisierung im hydraulischen Messkreislauf
- Regelarmatur zur Einstellung eines für die Kalibrierung vorgegebenen Durchflusswertes im hydraulischen Messkreislauf

- *Diverter* (Umschaltklappe) zur Umlenkung des Flüssigkeitsstromes in den Wägebehälter während des Messvorganges
- *Waage mit Wägebehälter*
- *Prüfling*, das zu kalibrierende Durchflussmessgerät
- *Temperaturmesseinrichtung* (gegebenenfalls auch Druck- und Dichtemessung) zur Erfassung der Zustandsgrößen des Prüfmediums

Grundsätzlich gibt es für eine derartige gravimetrische Durchflussmesseinrichtung zwei Betriebsweisen:

- **Stehender START-STOPP-Betrieb**

Der hydraulische Kreislauf ist zum Wägebehälter hin „geschlossen“, d.h. die Umlenkeinrichtung (allgemeiner Art) ist ständig in Richtung zum Wägebehälter geschaltet. Im Ausgangszustand vor der Messung ist das Regelventil geschlossen und der Durchfluss hat demzufolge den Wert Null. Zur Erfassung einer vorgegebenen Messmenge im Wägebehälter wird das Regelventil auf den Wert geöffnet, der für die Einstellung eines vorgegebenen Durchflusswertes erforderlich ist. Nach Erreichen der Messmenge im Wägebehälter wird durch das Schließen des Regelventils der Durchfluss wieder auf den Wert Null gestellt.

Entscheidende Nachteile dieses Verfahrens sind, dass die Kalibrierung für einen vorgegebenen Durchflusswert jeweils bei dem Wert Null startet und während einer Messung möglichst schnell und exakt auf den zu kalibrierenden Wert geregelt werden muss und dass der Prüfling während dieser An- und Abfahrvorgänge jeweils entsprechende Teile seiner Fehlerkennlinie durchfährt.

- **Fliegender START-STOPP-Betrieb**

Bei dieser Betriebsweise wird vor und während der Messung die Messflüssigkeit kontinuierlich in einem geschlossenen Kreislauf bewegt. Von den Pumpen wird die Flüssigkeit aus dem Vorratsbehälter in den Hochbehälter gefördert. Eine Teilmenge läuft über das Wehr zurück in den Tiefbehälter, der größte Teil strömt über die Messstrecke durch den Prüfling und dann über den Diverter zurück in den Vorratstank. Durch die Höhe der Überlaufkante im Hochbehälter wird der hydrostatische Druck vorgegeben, mit dem die Messflüssigkeit durch die Messstrecke bewegt wird. Mit Hilfe der Regelarmatur wird der für die Kalibrierung gewünschte Durchflusswert einreguliert.

Der eigentliche Messvorgang wird dadurch gestartet, dass die Umschaltklappe (Diverter) von der Bypass-Position in die Umlenkposition zum Wägebehälter geschaltet wird. Beim Durchgang durch den Flüssigkeitsstrahl wird in der Mittenposition [6, 7] der Umschaltklappe die Erfassung der Messsignale des Prüflings gestartet und die Messung der Messzeit gestartet. Nach Erreichen einer vorgegebenen Messmenge im Wägebehälter wird der Diverter wieder in seine Ausgangslage zurückgeschaltet. Beim Durchgang durch die Strahlmitte wird die Erfassung der Prüflingausgangssignale und die Messzeitmessung gestoppt.

Als Ergebnis der Kalibrierung werden aus den entsprechenden Werten der Flüssigkeitsmenge im Wägebehälter, dem aufsummierten Ausgangssignal des Prüflings (z.B. durch Impulzzählung) sowie der gemessenen Messzeit unter Berücksichtigung der Dichte des Prüfmediums die Werte für den K-Faktor des Durchflussmessgerätes und der (mittleren) Durchflusswert berechnet.

In Kalibriereinrichtungen mit höchsten Anforderungen bezüglich der Messunsicherheit – und so auch im Hydrodynamischen Prüffeld - kommt fast ausschließlich die statische Wägung im Zusammenwirken mit einer Umschalteinrichtung (Diverter) für den fliegenden START-STOPP-Betrieb zum Einsatz.

Tabelle A.1 im Anhang A.1 gibt eine Übersicht über Möglichkeiten zur Umschaltung und Auswertung unterschiedlicher Sensorsignale von Durchflussmessgeräten.

3.2 Kombinierte gravimetrisch-volumetrische Durchfluss-Normalmesseinrichtung

Eine weitere Betriebsart, in der das Hydrodynamische Prüffeld betrieben werden kann, basiert auf der Verwendung eines Volumennormales als Fundamentalmesseinrichtung. Dieses Volumennormal besteht hier in seiner konkreten Realisierung aus einer Rohrprüfstrecke (Compact Pipe Prover) [10], die, wie im Bild 3 zu ersehen ist, zusammen mit dem Prüfling und der gravimetrischen Normalmesseinrichtung in Serie vom Prüfmedium durchflossen wird, so dass in beiden Normalen nahezu identische Prozessbedingungen herrschen.

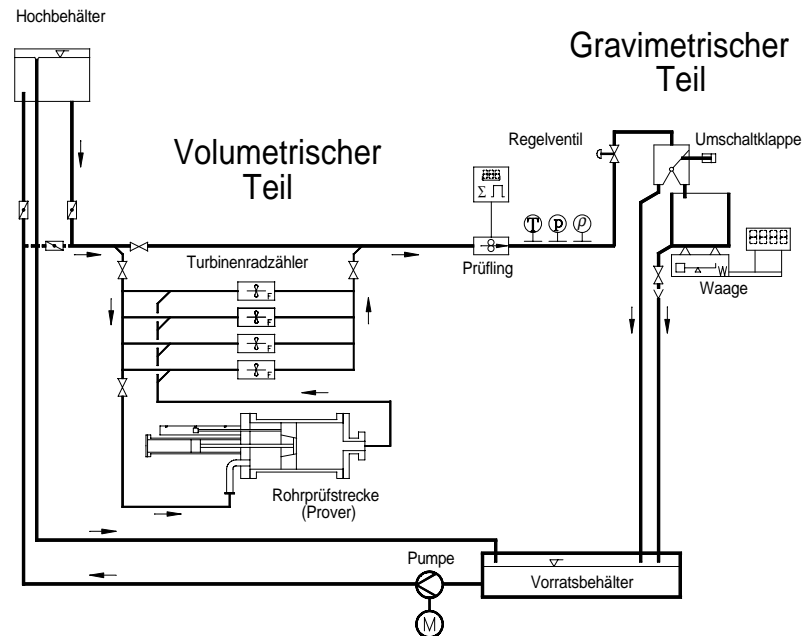


Bild 3 Kombinierte gravimetrisch-volumetrische Durchfluss-Normalmesseinrichtung

Auf der Grundlage dieser Messbedingungen ist es mittels der beiden auf physikalisch grundsätzlich unterschiedlichen Messprinzipien beruhenden Fundamentalmesseinrichtungen möglich, innerhalb des Hydrodynamischen Prüffeldes Vergleichsmessungen durchzuführen. Durch diese direkten Vergleichsmessungen wird es erstmalig möglich, die Auswirkung bisher kaum realistischer einschätzbarer Einflussgrößen auf die Messunsicherheit zu erkennen und quantitativ zu erfassen [5].

Eine grundlegende Schwierigkeit, die funktionelle Verknüpfung dieser beiden Fundamentalmessverfahren vorzunehmen, besteht jedoch darin, dass die Messzeiten bei der Kalibrierung sehr weit differieren:

- *gravimetrisches Verfahren*: Messzeiten für einen Durchflussmesspunkt liegen im Bereich einer Minute und darüber;
- *volumetrisches Verfahren* (Prover): Messzeiten für einen Durchflussmesspunkt liegen (in Abhängigkeit vom aktuellen Durchflusswert) im Bereich von Sekunden bzw. gegebenenfalls auch unterhalb einer Sekunde.

Aus diesem Grunde ist der unmittelbare Vergleich der beiden, auf grundsätzlich unterschiedlichen Wegen ermittelten Durchflusswerte nicht bzw. nur in einem sehr eingeschränkten (unteren) Durchflussbereich möglich.

Zur Lösung dieser Problemstellung wurde folgende Geräteanordnung realisiert [5]:

- Zwischen der Rohrprüfstrecke und der gravimetrischen Messeinrichtung (bestehend aus Waage und Umschaltvorrichtung für das Messgut) wird funktionell ein **Transfornormal** (ein oder mehrere parallel geschaltete, hoch genaue Turbinenzähler) eingefügt.

- Das Transfernnormal wird durch zyklisch wiederholte Messspiele der Rohrprüfstrecke in sehr kurzen Zeitabständen rekaliert.
- Der Start eines gravimetrischen Kalibriervorganges (Bewegung der Umschaltklappe in Richtung Wägetank) startet zeitgleich die Erfassung der von dem Transfernnormal abgegebenen Messsignalimpulse durch einen speziellen Durchflussrechner.
- Mit Beendigung des Kalibriervorganges (Rückschalten der Umschaltklappe in Bypass-Position) wird ebenfalls wieder zeitgleich die Erfassung der vom Zähler abgegebenen Signale gestoppt.

Mittels dieser speziellen Messapparatur wird jeweils eine gravimetrisch und eine volumetrisch gesammelte Messmenge bei gleich langen Messzeiten und unter identischen Prozessbedingungen erfasst. Auf diese Weise ist dann ein Vergleich zwischen gravimetrischer und volumetrischer Normalmesseinrichtung möglich. Die beschriebene Messanordnung ist im Bild 3 vereinfacht dargestellt.

4 AUFBAU UND FUNKTION DES HYDRODYNAMISCHEN PRÜFFELDES

4.1 Übersicht der Hauptkomponenten

Bild 4 zeigt den prinzipiellen Aufbau und die wichtigsten Komponenten des Hydrodynamischen Prüffeldes. Man erkennt die in Abschnitt 3.2 in seiner prinzipiellen Funktion *beschriebene kombinierte gravimetrisch-volumetrische Durchfluss-Normalmesseinrichtung*, die lediglich bezüglich des dort beschriebenen Prinzipaufbaus bei der technischen Umsetzung eine Erweiterung erfahren hat: Das Hydrodynamische Prüffeld besitzt insgesamt 2 Messtrecken, die alternativ bei unterschiedlich hohen Durchflusswerten für den Einbau und die Kalibrierung der entsprechenden Prüflinge genutzt werden.

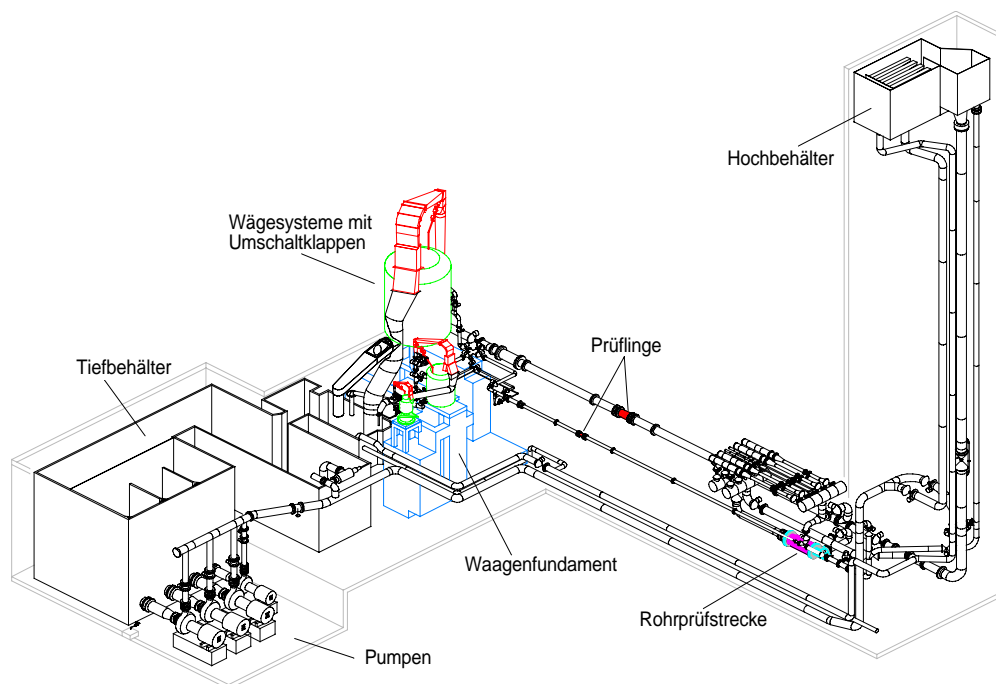


Bild 4 Hydrodynamisches Prüffeld - Anlagenteil ohne Gebäude

In Tabelle 1 sind die projektierten Funktions- und Leistungskenngrößen des Hydrodynamischen Prüffeldes in einer Übersicht dargestellt.

Tabelle 1 *Projektierte Charakteristika des Hydrodynamischen Prüffeldes*

Messgrößen:	Volumendurchfluss Massedurchfluss Volumen Masse	Durchflussmessgeräte und Volumen- bzw. Massezähler
Messarten:	a) fliegender START / STOPP b) stehender START / STOP	<i>Steuerung über:</i> Umschaltklappe AUF-ZU-Ventil
Bezugsnormale:	Gravimetrische Messung Volumetrische Messung	Waagen: 30 t 3 t 0,3 t Rohrprüfstrecke
Betriebsarten:	Betrieb mit Hochbehälter Pumpen-Direkt-Betrieb	Konstanter Druck in der Messstrecke (ca. 0,35 MPa) Variabler Druck in der Messstrecke (bis ca. 0,6 MPa)
Nennweiten:	Messstrecke A Messstrecke B	DN 200 ... DN 400 DN 20 ... DN 150
Durchflussbereich:	Messstrecke A Messstrecke B	3 m ³ /h ... 2100 m ³ /h 0,3 m ³ /h ... 320 m ³ /h
Erweiterte Messunsicherheit:	±0,02 %	(Betrieb mit Hochbehälter)
Wiederhol-Standardabweichung:	±0,004 %	(Betrieb mit Hochbehälter)
Zulässiger Temperaturbereich:	20 °C ... 23 °C	
Temperaturkonstanz:	±0,05 °C ±0,1 °C	während einer Messung während einer Messreihe

4.2 Komponenten zur Erzeugung des Messdurchflusses

Die für die Bereitstellung der Messflüssigkeit und für die Erzeugung eines zeitlich konstanten, und exakt einstellbaren Messdurchflusses relevanten Komponenten des Prüffeldes sind:

- **Tief-/Vorratsbehälter** mit einem Volumeninhalt von ca. 380 m³ (umfasst als Nebenanlagen auch Einrichtungen zur Wasseraufbereitung und Wasserentkeimung)
- **Pumpenanlage** mit Drehzahl geregelten elektrischen Antrieben: ca. 640 kW
- **Hochbehälter** mit Überlaufwehr: Höhe ca. 30 m, Volumeninhalt ca. 45 m³

Durch die Nutzung eines Hochbehälters mit Überlaufwehr wird der hydrostatische Druck in der Messleitung konstant gehalten und auf diese Weise der Durchfluss stabilisiert (wenn an Regelarmaturen im Messkreislauf keine Verstellungen vorgenommen werden). Diese „passive“ Stabilisierungswirkung wird zusätzlich durch eine elektronische Füllstandsregelung mit einem hoch auflösenden Füllstandssensor ergänzt. Im Bild 5 ist neben dem Überlaufwehr der Sensor für eine Füllstandsgrenzwertüberwachung zu erkennen. Für die hoch genaue Füllstandsmessung wurde eine Schikane (Rohr) zur Beruhigung der Wasseroberfläche eingebaut; der dazugehörige Ultraschall-Füllstandssensor befindet sich oberhalb des Bildausschnittes und ist nicht sichtbar.



Bild 5 Hochbehälter mit Überlaufrinnen und Füllstandssensoren

4.3 Messstrecken

Die Messstrecken sind konstruktiv und funktionell die wichtigsten Teile des Hydrodynamischen Prüffeldes. Im Prüffeld sind zwei Messzweige für unterschiedliche Rohr- und Prüflingsnennweiten vorhanden. Entsprechende Angaben sind in Tabelle 1 zu finden.

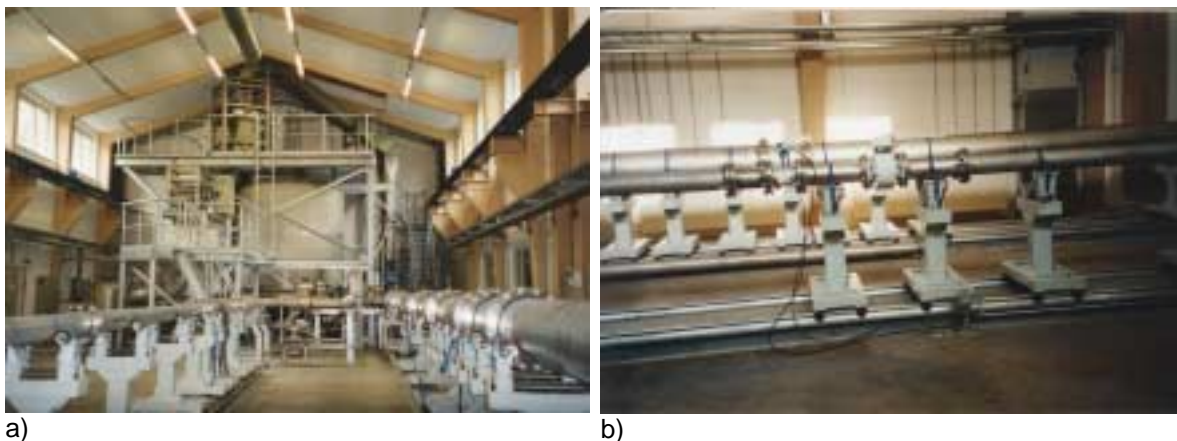


Bild 6 Messstrecken:

- a) *Blick in Durchflussrichtung mit den Wägeeinrichtungen im Hintergrund*
- b) *Seitenansicht (eingebauter Prüfling in der Messstrecke DN 150)*

Der als Messstrecke deklarierte Teil des Hydrodynamischen Prüffeldes erfüllt folgende funktionellen und konstruktiven Aufgaben:

- Strömungskonditionierung des Prüfmediums in der Zuführung zu dem oder den Prüflingen, d.h. Herausbildung eines vorgegebenen Strömungsprofils, einer vorgegebenen Medientemperatur und Einstellung eines definierten und während der Messungen konstanten Prozessdruckes.
- Aufnahme des oder der Prüflinge über eine mechanische Einspannung mit Achszentrierung, zur Aufnahme konstruktiv unterschiedlicher Prüflinge.

Die Bilder 6a) und b) zeigen die Anordnung der beiden Messstrecken (DN 150 und DN 400) in der Anlagenhalle sowie die entsprechenden auf Schienen geführten Rohrunterstützungen.

4.4 Gravimetrisches Referenznormal – Wägesysteme mit integrierten Kalibriersystemen

Wägesysteme

Das Hydrodynamische Prüffeld ist mit 3 Wägeeinrichtungen unterschiedlicher Größe ausgestattet: 30-t-, 3-t- und 0,3-t-Waage. Diese 3 Wägesysteme weisen grundsätzlich das gleiche Funktionsprinzip auf: Sie vereinigen jeweils zwei von einander unabhängige Wägesysteme, die physikalisch unterschiedliche Messprinzipien nutzen, und sie sind jeweils mit einer integrierten Kalibriereinrichtung ausgestattet. Dieser grundsätzliche Aufbau der Wägeeinrichtungen wird im Bild 7 anhand des 30-t-Wägesystems veranschaulicht.

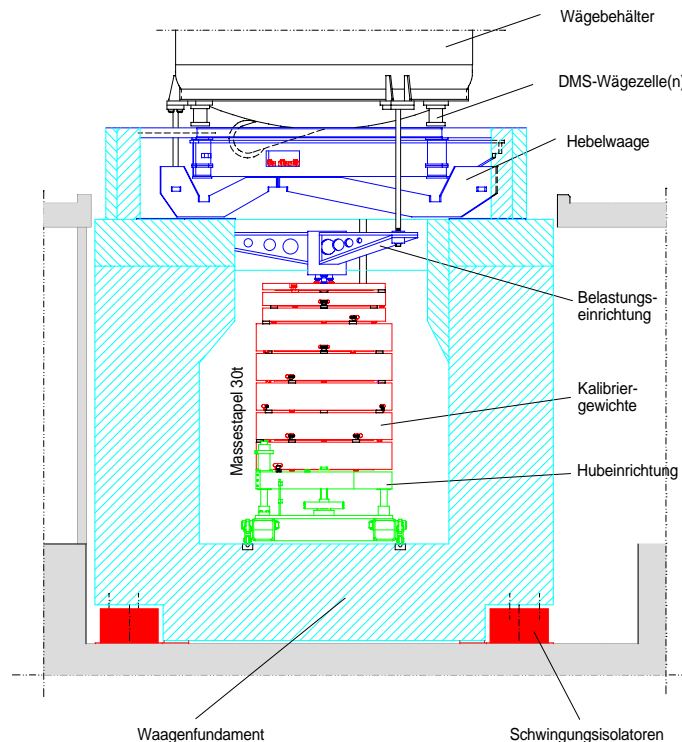


Bild 7 Prinzipieller Aufbau des 30-t-Wägesystems mit integrierter Kalibriereinrichtung (Belastungseinrichtung)

Als Messprinzipien kommen in den 3 Wägesystemen - angepasst an den betreffenden Wägemessbereich - jeweils eine Hebelwaage mit elektronischer Wägezelle und darüber angeordneten DMS-Wägezellen zum Einsatz.

Sämtliche Funktionen dieser kombinierten Wägesysteme und der dazugehörigen Waagenkalibriereinrichtungen werden über das Prozessleitsystem des Prüffeldes visualisiert und bedient.

Abgeleitet aus dem Messunsicherheitsbudget der gesamten Durchflussmessanlage wurden der gravimetrischen und der volumetrischen Normalmesseinrichtung maximal zulässige Messunsicherheitsbeiträge zugebilligt, die entsprechenden Werte für das Hydrodynamische Prüffeld sind in Tabelle 2 dargestellt [5].

Aus den dort den Wägesystemen zugestandenen individuellen Messunsicherheitsbeiträgen wurden die in Tabelle 3 aufgelisteten Anforderungen und Funktionsparameter [14] der 3 Wägesysteme abgeleitet.

Aufgrund der geforderten hohen Anforderungen an die Wägesysteme bezüglich der Messauflösung und der Messunsicherheit bewegte man sich bei der Realisierung der gravimetrischen Normalmesseinrichtung an der Grenze des technisch Machbaren. Es mussten insbesondere störende dynamische Krafteinwirkungen aus dem Betrieb der Anlage bei der technischen Auslegung berücksichtigt werden, die bei konventionellen Kraftmess- oder Wägesystemen im allgemeinen nicht in dieser Größe auftreten. Deshalb wurden besondere Vorkehrungen zur Schwingungsisolierung getroffen.

Tabelle 2 Grundlegende Anforderungen an das gravimetrische und an das volumetrische Normal des Hydrodynamischen Prüffeldes [5]

	Gravimetrisches System (Waagen)	Volumetrisches System (Rohrprüfstrecke)
Durchflussbereich	0,3 m ³ /h...2.100 m ³ /h	0,3 m ³ /h...550 m ³ /h
Gemessene Größen	75 kg...30.000 kg	250 Liter
Druck	bis 500 kPa	bis 500 kPa
Standardmessunsicherheit	0,01 %	0,01 %
Standardabweichung (bei Wiederholmessungen)	0,004 %	0,004 %

Tabelle 3 Spezifikation der Wägesysteme des Hydrodynamischen Prüffeldes [14]

30-t-Waage:	Höchstlast für Messungen	30 t
	Mindestlast	3 t
	Wägebereich	3 ... 30 t
	Belastbarkeit, inkl. Tara	45 t
	Teilungswert <i>d</i>	10 g
	zul. rel. Fehlergrenzen im Wägebereich (vom Messwert)	$\pm 3 \cdot 10^{-5}$
	rel.. Standardabweichung im Wägebereich (vom Messwert)	$1 \cdot 10^{-5}$
	erweiterte rel. Messunsicherheit im Wägebereich (Vertrauensniveau 95 %)	$5 \cdot 10^{-5}$
3-t-Waage:	Höchstlast für Messungen	3000 kg
	Mindestlast	300 kg
	Wägebereich	300 ... 3000 kg
	Belastbarkeit, inkl. Tara	4500 kg
	Teilungswert <i>d</i>	1 g
	zul. rel. Fehlergrenzen im Wägebereich (vom Messwert)	$\pm 3 \cdot 10^{-5}$
	rel.. Standardabweichung im Wägebereich (vom Messwert)	$1 \cdot 10^{-5}$
	erweiterte rel. Messunsicherheit im Wägebereich (Vertrauensniveau 95 %)	$5 \cdot 10^{-5}$
0,3-t-Waage:	Höchstlast für Messungen	300 kg
	Mindestlast	15 kg
	Wägebereich	15 ... 300 kg
	Belastbarkeit, inkl. Tara	450 kg
	Teilungswert <i>d</i>	0,1 g
	zul. rel. Fehlergrenzen im Wägebereich (vom Messwert)	$\pm 3 \cdot 10^{-5}$
	rel.. Standardabweichung im Wägebereich (vom Messwert)	$5 \cdot 10^{-6}$
	erweiterte rel. Messunsicherheit im Wägebereich(Vertrauensniveau 95 %)	$5 \cdot 10^{-5}$

Maßnahmen zur Schwingungsdämpfung am Waagenfundament

Zur Lösung der schwingungstechnischen Problemstellungen an den Wägeeinrichtungen wurden neben Modell basierten Finite-Elemente-Berechnungen [8] experimentelle Untersuchungen und Schwingungsmessungen an einem kleineren Durchflussprüfstand durchgeführt.

Die aufgrund dieser Untersuchungen entwickelte technische Lösung [8] beinhaltet ein vom Baukörper des Gebäudes getrenntes und auf 13 pneumatischen Schwingungsisolatoren gelagertes Betonfundament, auf dem die 3 Wägesysteme mit den Belastungseinrichtungen angeordnet sind. Dieser Aufbau ist bereits im Bild 7 im Prinzip erkennbar.

Bild 8a zeigt das Waagenfundament im Rohbauzustand vor dem technischen Ausbau mit den Schwingungsisolatoren und vor der Überbauung mit dem Hallenfußboden. Bild 8b zeigt einige der unter dem Waagenfundament eingebauten Schwingungsisolatoren.



Bild 8 a) Waagenfundament im Rohbauzustand
b) pneumatische Schwingungsisolatoren unter dem Waagenfundament

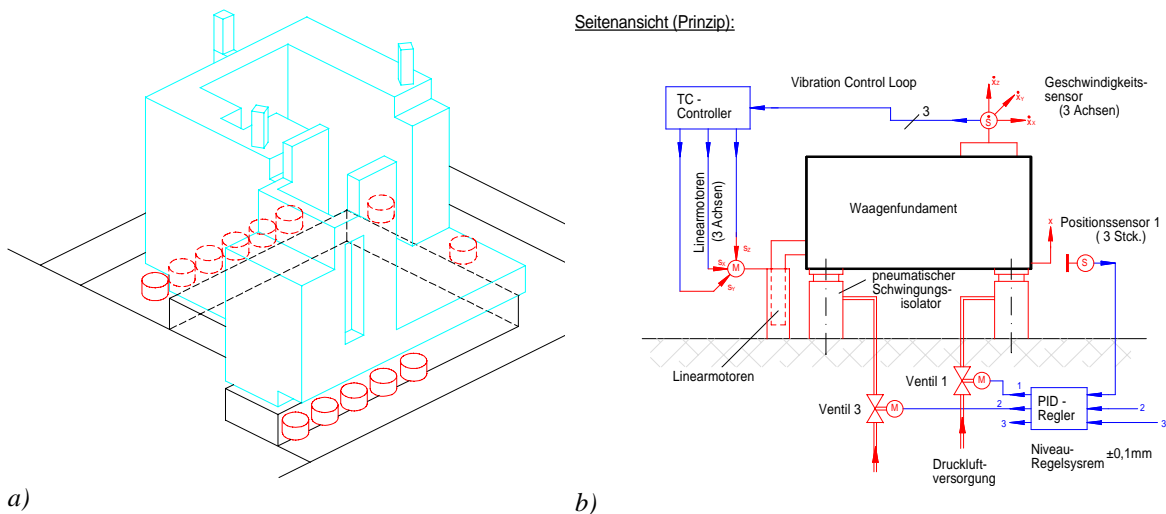


Bild 9 a) Anordnung der pneumatische Schwingungsisolatoren unter dem Fundament
b) aktives Niveauregelsystem mit dynamischer Störgrößenaufschaltung

Die Schwingungsisolatoren bilden zusammen mit dem Betonfundamentkörper ein passives Schwingungsdämpfungssystem. Ein elektronisches Regelsystem mit hoch auflösenden Wegsensoren realisiert zusätzlich ein Niveau- und Lageregelssystem, bei dem die Schwingungsisolatoren als pneumatische Aktoren genutzt werden. Diesem quasistatischen Niveauregelsystem ist zusätzlich ein dynamisch schnelles Regelsystem funktionell überlagert. Dieses schnelle Regelsystem nutzt die von Geschwindigkeitssensoren auf dem Betonfundament aufgenommenen Signale, um über elektrische Aktoren an 4 Eckpunkten des Fundaments (elektrische Linearmotoren jeweils für mehrere Achsen) durch Störungsanregung verursachte schnelle Lageänderungen des Waagenfundaments auszuregeln.

Durchfluss-Umlenkeinrichtungen (Diverter)

In Durchflusskalibriereinrichtungen mit fliegendem START-STOPP-Betrieb (siehe Abschnitt 3.1) ist die Durchflussumlenkeinrichtung, auch als Umschaltklappe oder Diverter bezeichnet, eine funktionsrelevante Baugruppe, die bei der Bestimmung des Messunsicherheitsbudgets des Messprozesses berücksichtigt werden muss.

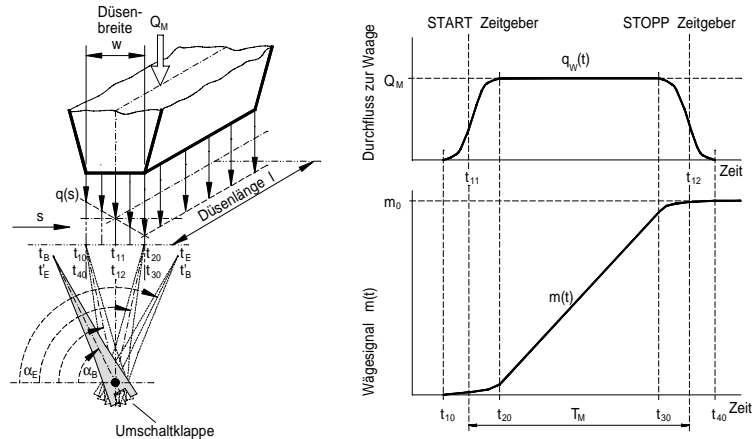


Bild 10 Umschaltklappe, Strömungsverlauf am Düsenaustritt, Zeitverläufe für den Durchfluss zum Waagenbehälter und für den Wägewert

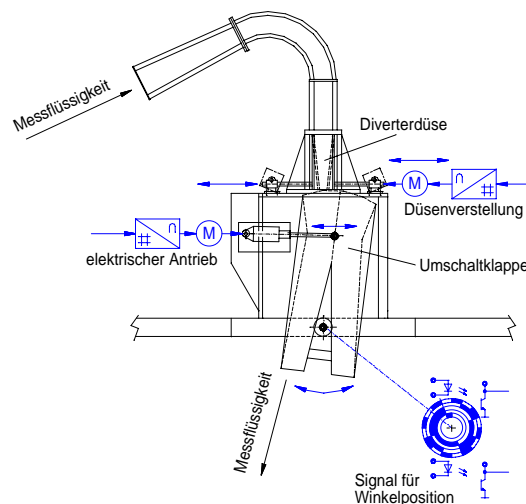


Bild 11 Umschaltklappe mit elektrischem Antrieb und digitaler Steuerung



Bild 12 Mittlere Umschaltklappe über der 3-t-Waage

Unter dem Aspekt eines minimierten Beitrages zur Gesamtmessunsicherheit der Anlage wurden die Anforderungen an die mittlere Umschaltklappe (3-t-Waage) gemäß [4] spezifiziert, technisch umgesetzt [6] und erfolgreich verifiziert.

Das Strömungsprofil am Düsenaustritt des Diverters wird durch die Anströmröhrleitungen in der Weise konditioniert, dass ein vorgegebenes möglichst konstantes Strömungsprofil erreicht wird (Bild 10). Durch LDA-basierte Geschwindigkeitsmessungen im Düsenauslass konnte die Erfüllung dieser Anforderung bei der verwendeten Konstruktion nachgewiesen werden.

Die Anforderungen an die Dynamik des Umschaltvorganges werden durch den Einsatz einer elektrischen Servopositionsregelung technisch umgesetzt werden (Bild 11). Die Messung der aktuellen Diverterposition während des Umschaltvorganges erfolgt mittels digitaler Winkel-Encoder. Die Einstellung der Schaltposition für die Messzeiterfassung erfolgt elektronisch durch die Programmierung der entsprechenden Steuerregister in der Ansterelektronik des Diverters [7].

4.5 Volumetrisches Referenznormal – Rohrprüfstrecke und Transfernormale

Als volumetrische Normalmesseinrichtung ist in das Hydrodynamische Prüffeld eine Rohrprüfstrecke (Compact Prover) [10] integriert worden. Die Rohrprüfstrecke kann entweder separat und unabhängig vom gravimetrischen System genutzt werden, oder im Zusammenwirken mit diesem System.

Abgeleitet von den Messunsicherheitsanforderungen an das Gesamtsystem und seine Teilkomponenten (Tabelle 2) wurde für den Prover die Spezifikation gemäß Tabelle 4 abgeleitet.

Tabelle 4 Anforderungsspezifikation der Rohrprüfstrecke [14]

Nenngröße:	DN 600 (24 ")
Volumenstrombereich:	1,6 ...1600 m ³ /h
Messvolumen:	ca. 250 Liter
Durchmesser des Messrohres:	ca. 647 mm
Messhublänge	ca. 759 mm
Messrohrlänge:	ca. 1670 mm
Genauigkeit der Kolbenwegmessung:	±3 µm (mit der Auflösung 1 µm)
zulässiger Betriebsdruck:	PN 16

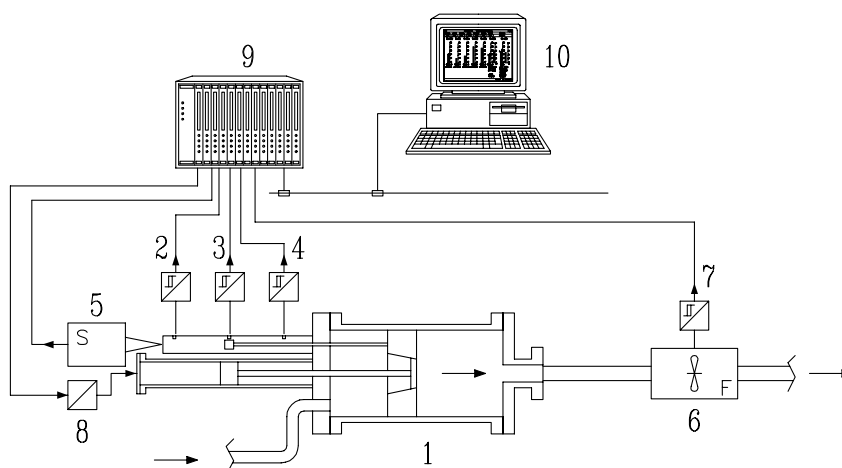


Bild 13 Rohrprüfstrecke mit Transfernormal (Prinzip)

- 1 Rohrprüfstrecke (Prover), 2, 3, 4 Wegmarkendetektoren (Initiatoren),
5 digitales Wegmesssystem, 6 Turbinenzähler (Transfernormal),
7 Signalerfassung Turbinenzähler, 8 Aktor zur Prover-Steuerung,
9 Rechner zur Signalverarbeitung (Flow Computer), 10 Bedienung und
Anzeige (Prozessleitsystem)

Die Rohrprüfstrecke ist über einen speziellen Flow-Computer funktionell als peripheres Subsystem in das Prozessleitsystem der Gesamtanlage eingebunden. Wie das im Bild 13 angedeutet wurde, erfolgt diese Anbindung an das Leitsystem über ein serielles Bussystem (Feldbus: Modbus).

Der Betrieb des Provers mit Turbinenzählern (Transfernormalen) in einer kombinierten gravimetrisch-volumetrischen Durchfluss-Normalmeseinrichtung wurde bereits im Abschnitt 3.2 beschrieben.

Als Zusatzelektronik ist der Prover mit einem digitalen Wegmesssystem ausgestattet, mit dem der zeitliche Verlauf der Bewegung des Proverkolbens für spezielle Untersuchungen erfasst und aufgezeichnet werden kann.

4.6 Automatische Steuer- und Releinrichtungen

Zur Erfüllung der funktionsbestimmenden Aufgaben des Hydrodynamischen Prüffeldes ist es erforderlich, die Hauptprozessgröße Durchfluss sowie die Prozesszustandsgrößen Temperatur und Druck in der Messstrecke zu stabilisieren bzw. Sollwert geführt zu regeln.

Die beiden Hauptregelkreise, die bei Turmbetrieb mit gleichzeitiger Nutzung des Überlaufwehres im Hochbehälter zur Einstellung definierter Prozessparameter sorgen, sind:

- die **Durchflussregelung** (Bild 14) und
- die **Temperaturregelung** (Bild 15)

Aufgrund der thermischen Wirkung, die aus der Bewegung der Wassermassen im Wasserkreislauf resultiert, sind die beiden Regelkreise in ihren Regelwirkungen wechselseitig miteinander gekoppelt. Aus diesem Grunde kommen spezielle Regelstrategien zur Anwendung, die als Sondersoftware in einem Echtzeit-Industrierechner implementiert wurden (Bild 18: VMEbus-Rechner).

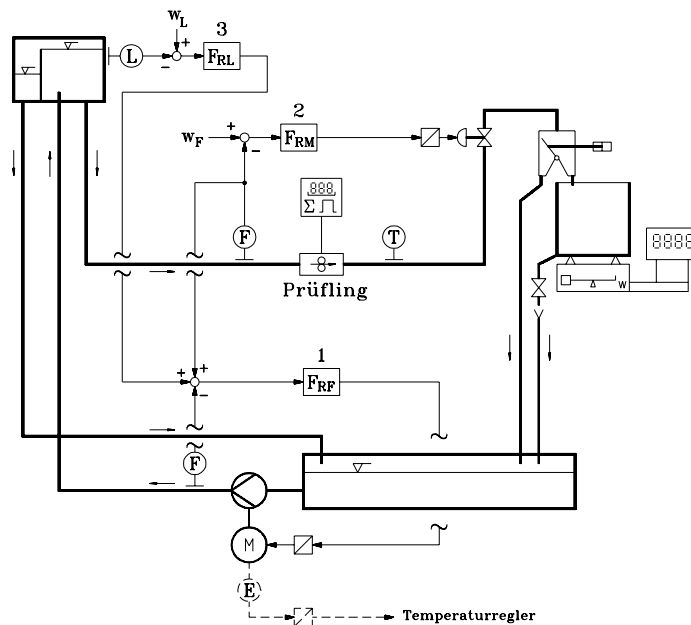


Bild 14 Prinzip der Durchflussregelung im der Betriebsart Turmbetrieb
 1 Durchflussregler Pumpenantrieb, 2 Durchflussregler Messzweig,
 3 Füllstandsregler Hochbehälter

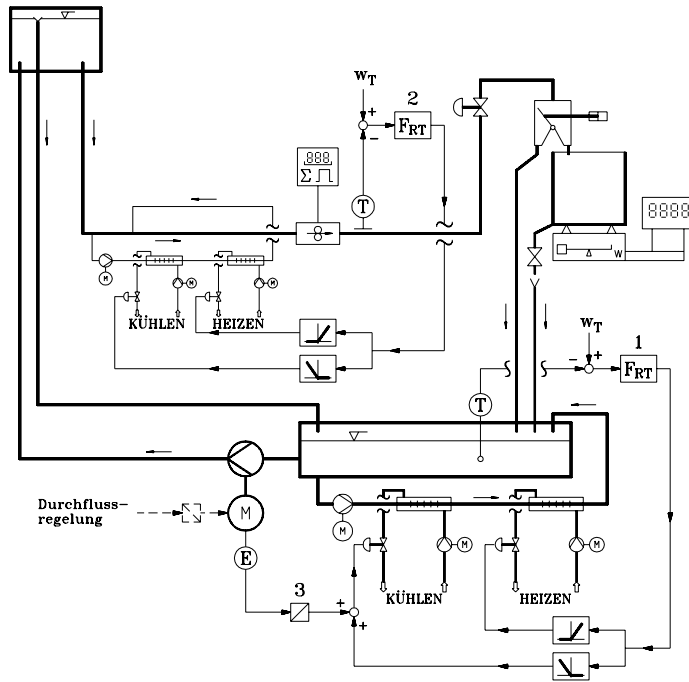


Bild 15 Prinzip der Temperaturregelung
 1 Temperaturregler GROB, 2 Temperaturregler FEIN,
 3 Störgrößenaufschaltung (Feed Forward Control)

Rechentchnik und Informationsverarbeitung

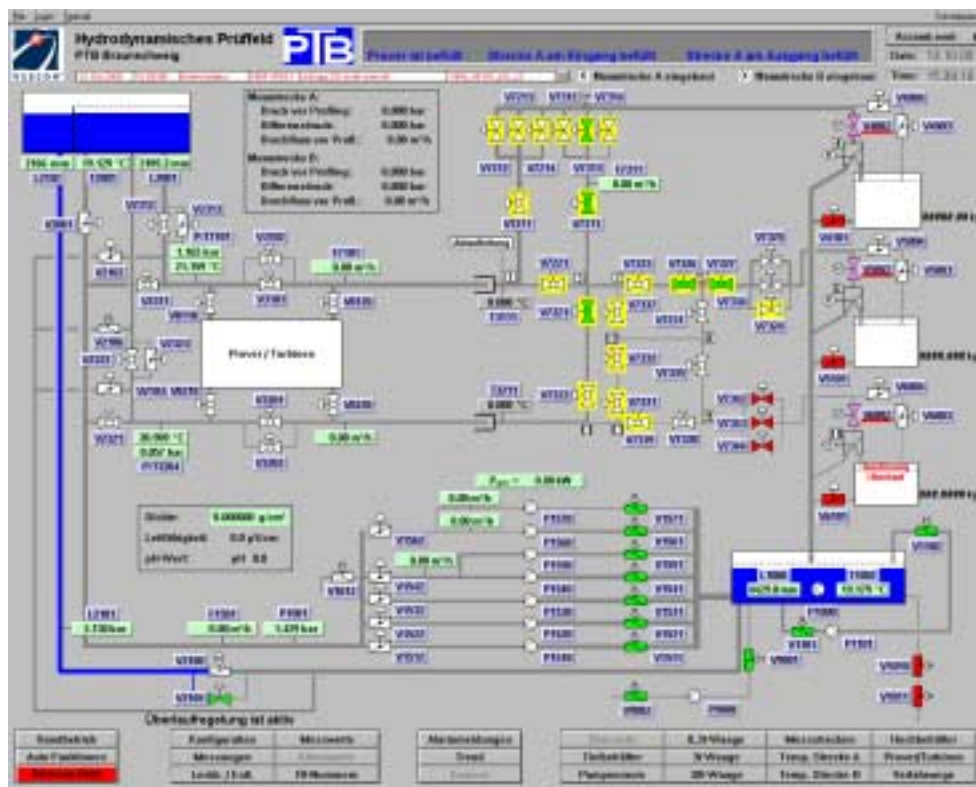


Bild 17 Bildschirmbedienoberfläche: Darstellung ANLAGENÜBERSICHT

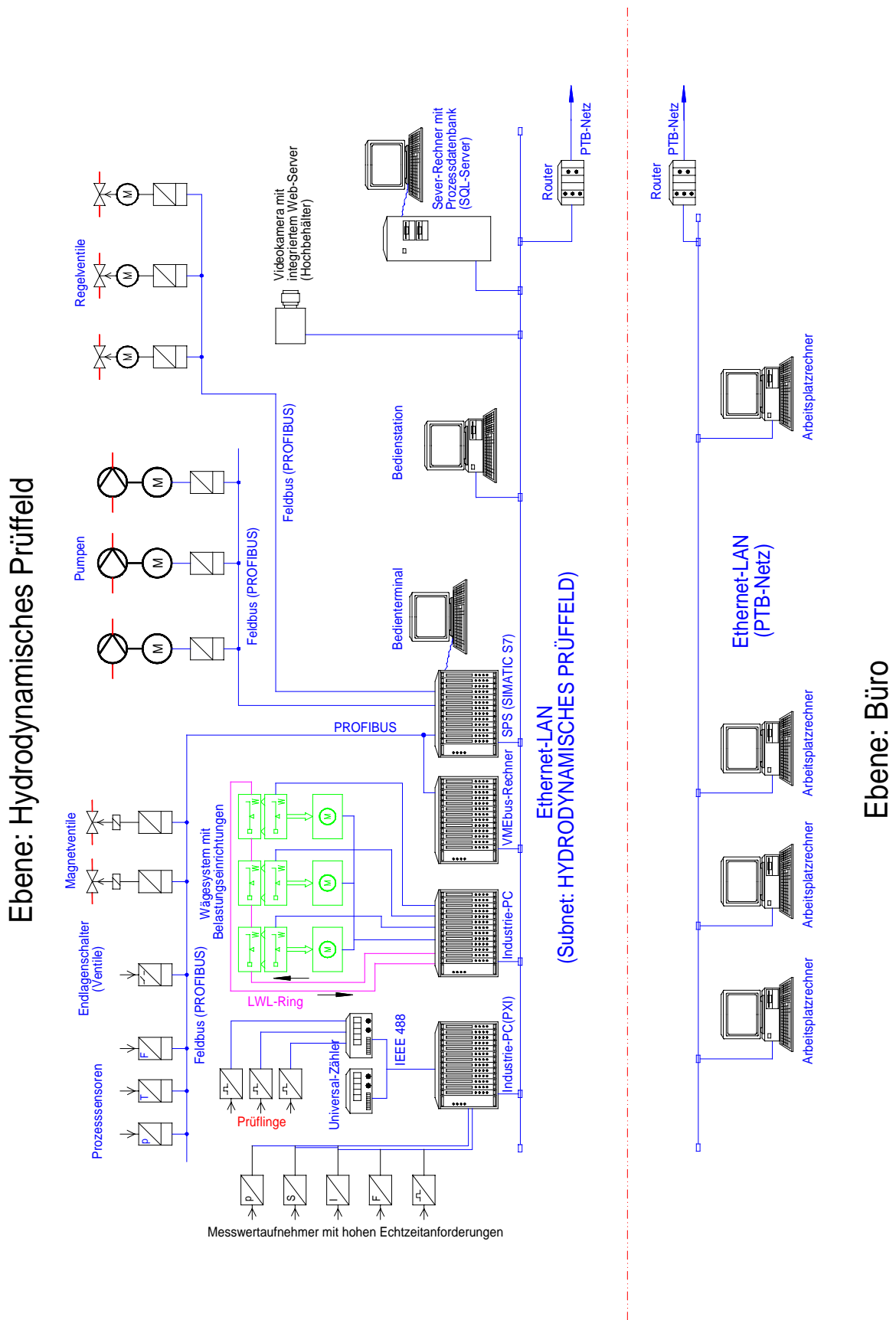


Bild 18 IT-Infrastruktur zur Informationsverarbeitung und -nutzung im "Hydrodynamischen Prüffeld"

Die Gesamtanlage des Hydrodynamischen Prüffeldes wird mittels eines rechnergestützten Prozessleitsystems bedient (Bild 17) und gesteuert. Dieses Leitsystem umfasst folgende Teilsysteme:

- SPS (Speicher programmierbare Steuerung SIMATIC S7) für konventionelle Steuerungsabläufe und Antriebsregelungen
- Feldbus-Subsysteme (PROFIBUS) zur Erfassung der Prozessmesswerte in der Anlage
- Industrie-PC-Rechner zur Erfassung spezieller Messgrößen (Wägewerte, Dichtewerte des Prüfmediums Wasser, Daten-Logger für Erfassung von schnellen Änderungen des Prozessdruckes u.a.)
- VMEbus-Industrierechner für die Realisierung spezieller Regelstrategien (hoch genaue Durchfluss- und Temperaturregelkreise)
- PC-Workstation als Bedien- und Engineeringstation (u.a. Steuerung des Provers und seines Flow Computers)

Alle Komponenten sind über Ethernet-LAN vernetzt und über einen Router als Subnetz an das PTB-weite Rechnernetz angeschlossen. Die Nutzung moderner Kommunikationstechnologien wie OPC (OLE for Process Control [11]) schafft eine einheitliche Basis für den Datenaustausch zwischen diesen Teilkomponenten und zu den Softwareapplikationen, die im Bereich der Bürodatenverarbeitung genutzt werden.

Auf der Basis des OPC-Standards stehen alle Daten, die im Rahmen von Kalibrierungen gewonnen und in der Prozessdatenbank des Leitsystems gespeichert werden, zur universellen Nutzung durch solche universellen Programme, wie das Tabellenkalkulationsprogramm EXCEL uneingeschränkt (prinzipiell) auf beliebigen PC-Arbeitsplatzrechnern der PTB zur Verfügung.

Bild 17 zeigt diese universelle Informationsinfrastruktur, die durch das Prozessleitsystem des Hydrodynamischen Prüffeldes realisiert wird.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Das **Hydrodynamische Prüffeld** repräsentiert eine **hoch genaue Kalibriereinrichtung** bzw. **Durchfluss-Normalmesseinrichtung** für die Messgrößen:

- | | | |
|--------------------------------------|------------------------|-----|
| - Volumendurchfluss | (in m ³ /h) | |
| - Massedurchfluss | (in kg/s) | |
| - Volumen | (in m ³) | und |
| - Masse von strömendem Wasser | (in kg) | |

Für die Messung der beiden letztgenannten Messgrößen wurde eine erweiterte Messunsicherheit [2] von 0,02 % als technisch notwendige Zielgröße vorgegeben. Diese Zielgröße resultiert aus den messtechnischen Anforderungen, die das Hydrodynamische Prüffeld in seiner künftigen Zweckbestimmung als **Nationales Primärnormal** für die o.g. Messgrößen zu erfüllen hat [10].

Für den Entwurf und die Auslegung der Gesamtanlage war das Messunsicherheitsbudget für den Messprozess [10] der Ausgangspunkt. Auf der Grundlage dieses Messunsicherheitsbudgets wurden unter Berücksichtigung der Messunsicherheitsbeiträge der einzelnen funktionslevanten Teilkomponenten:

- Wägesysteme
- Umschaltklappen (Diverter)
- Rohrprüfstrecke (Prover)
- Parallelschaltung zur Rohrprüfstrecke („Transfornormale“)
- Dichtemesseinrichtung

deren Anforderungen (zulässiger individueller Messunsicherheitsbeitrag) und daraus abgeleitete Kennwerte bestimmt und technisch umgesetzt.

Diese individuellen Anforderungen wurden bzw. werden durch entsprechende Abnahmeversuche verifiziert und sichern somit die projektierte Messunsicherheit der Durchfluss-Normalmesseinrichtung als Gesamtheit.

Alle in der Kalibrieranlage erfassten Prozessgrößen werden während der Kalibrierung eines oder mehrerer Prüflinge in der Prozessdatenbank des Leitsystems unter Echtzeitbedingungen (frei programmierbare Abtastrate) erfasst. Als Ergebnis einer Kalibrierung werden auf der Basis frei wählbarer Selektionskriterien ausgewählte, d.h. für die Kalibrierung bedeutsame Prozessgrößen in einer Langzeit-Datenbank abgespeichert und archiviert. Auf diese Weise ist eine durchgängige Transparenz aller Mess- und Kalibrierprogramme und somit auch ein durchgängiges Qualitätsmanagement während des Betriebes der Anlage gewährleistet.

6 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Verifizierung bereits fertig gestellter Teile und Komponenten des Hydrodynamischen Prüffeldes bezüglich der Einhaltung technischer Zielvorgaben für wichtige technische Parameter (wie z.B. die Funktionen bei der mittleren Umschaltklappe) zeigt, dass die Zielvorgabe für die erweiterte Messeinrichtung von 0,02 % nach der vollständigen Inbetriebnahme der Anlage und dem Feinabgleich wichtiger Baugruppen erreicht werden wird.

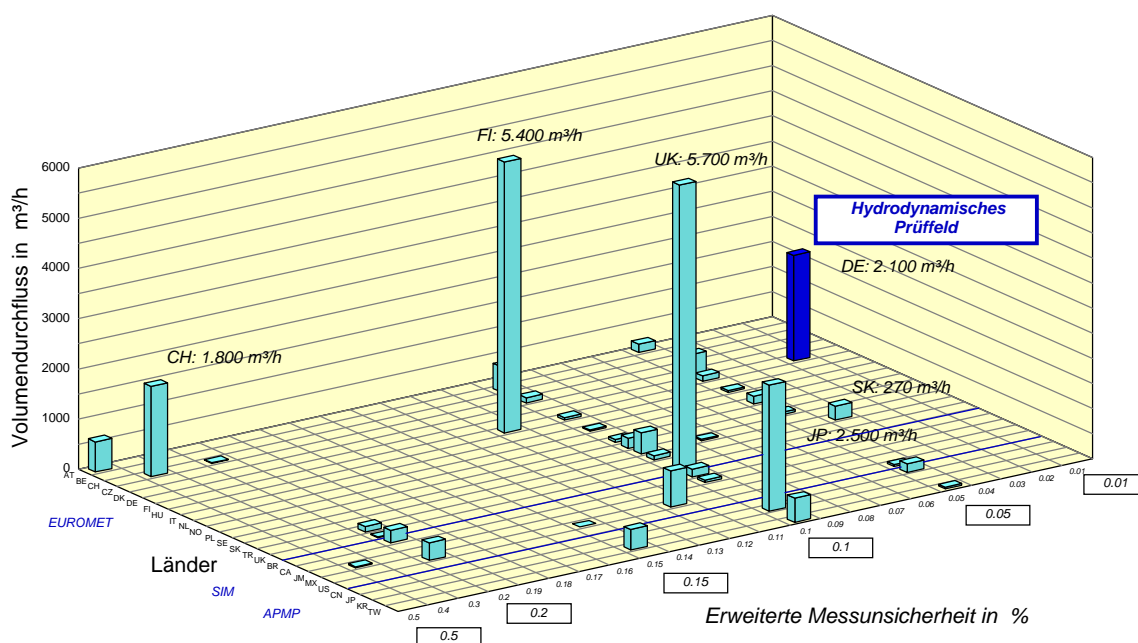


Bild 18 Kalibrier- und Messmöglichkeiten der nationalen metrologischen Institute von EUROMET, SIM (Amerika) und APMP (Asien)

Mit dem Erreichen dieser wichtigen Zielstellung wird das Hydrodynamische Prüffeld unter den Kalibriereinrichtungen der nationalen metrologischen Institute von EUROMET, SIM (Amerika) und APMP (Asien) eine exponierte Position einnehmen (siehe Bild 18) und sich international als interessanter und kompetenter Partner präsentieren.

Langfristig soll das Hydrodynamische Prüffeld generell die Funktion eines nationalen Normales für Flüssigkeiten übernehmen und an die Spitze der deutschen Kalibrierkette für die Flüssigkeitsmessung gestellt werden. Zu diesem Zweck sind Transfernormale zu entwickeln, deren messspezifischen Eigenschaften möglichst medienunabhängig sind, und die es somit ermöglichen, die unter Verwendung von Wasser als Prüfmedium gewonnenen Messergebnisse auf andere Medien und Prüfstände zu übertragen.

Quellenangaben

- [1] *Durchflußmessung von Flüssigkeiten in geschlossenen Leitungen - Wägeverfahren*, DIN / EN 24 185, 1993
- [2] *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, NPM 2.5 Nr 02-95, ISO 1992
- [3] W. Pöschel: *Methoden zur realistischen Bewertung der Meßunsicherheit von Normalmeßeinrichtungen zur Mengen- und Durchflußmessung*, Dissertationsschrift, TH Leuna-Merseburg, 1986
- [4] W. Pöschel, R. Engel: *The Concept of a New Primary Standard for Liquid Flow Measurement at PTB Braunschweig*, Proceedings of the 9th International Conference on Flow Measurement, (Lund, June 15-17, 1998), Lund, Sweden, 1998
- [5] W. Pöschel: *Internal and External Comparison Measurements for Ensuring Accuracy and Traceability in Flowmeter Calibration*, Proceedings of the 4th International Symposium on Fluid Flow Measurement, Denver, USA, 1999
- [6] W. Pöschel, R. Engel, D. Dopheide, H.J. Baade, H.J. Kecke, R. Praetor, N. Weist, E. Kurras: *A Unique Fluid Diverter Design for Water Flow Calibration Facilities*, Proceedings of the 10th International Conference on Flow Measurement, Salvador, Brazil, June 5-8, 2000
- [7] R. Engel, U. Klages: *A Novel Approach to Improve Diverter Performance in Liquid Flow Calibration Facilities*, Proceedings of the 10th International Conference on Flow Measurement, Salvador, Brazil, June 5-8, 2000
- [8] K. Beyer, B. Scholz: *1. Bericht zu den dynamischen Eigenschaften der Aufstellung der 30t-Waage*, Büro für Baudynamik GmbH, Stuttgart, 1998
- [9] W. Pöschel: *Die Aufgaben eines Primärnormals zur Sicherung der Vergleichbarkeit der Kalibrierergebnisse in der Durchflusssmesstechnik*, PTB-Seminar „Neue Entwicklungen bei der Kalibrierung von Durchflussmessgeräten“, PTB Braunschweig, 13.-14. 2001
- [10] H. Többen: *Kalibrierung einer Rohrprüfstrecke nach unterschiedlichen Verfahren*, PTB-Seminar „Neue Entwicklungen bei der Kalibrierung von Durchflussmessgeräten“, PTB Braunschweig, 13.-14. 2001
- [12] *OPC – OLE (Object Linking and Embedding) for Proces Control*, OPC Foundation, <http://www.opcfoundation.org/>
- [13] W. Pöschel, R. Engel, P. Schmengler: *Hydrodynamisches Prüffeld – Funktionsbeschreibung*, Arbeitsbericht, Planungsunterlagen für das Hydrodynamische Prüffeld (unveröffentlicht), PTB Braunschweig, Oktober 1998
- [14] Planungsgruppe Dröge-Baade-Nagaraj: *Ausschreibungsunterlage AFU-Bau, Hydrodynamisches Prüffeld in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt* (unveröffentlicht), 27.07.1998

Anmerkung:

Der Autor bedankt sich bei allen, die zur Erstellung dieses Beitrages beigetragen haben, in ganz besonderem Maße bei Herrn Dipl.-Ing. P. Schmengler für die Erstellung und Bearbeitung der zahlreichen grafischen Darstellungen.

ANHANG A.1: Messgrößen und Art der zu erfassenden Messsignale [13]

Tabelle A.1 Messgrößen und Art der zu erfassenden Messsignale

			Ergebnis der Prüfung	
Art der Meßwerterfassung	Anzeige- bzw. Ausgabewert	Volumenanzeige des Prüflings	Kalibrierwert des Prüflings	relative Messabweichung des Prüflings
1 Mechan. Zählwerk, visuell/manuell (Handeingabe)	$Z_i \sim \int_{t_1}^{t_i} Q_V(t) dt$	$V_P = Z_2 - Z_1$	---	$\frac{V_P - V_M}{V_M}$
2 Mechan. Zählwerk, Erfassung mit Videokamera (Bildverarbeitung)	$Z_i \sim \int_{t_1}^{t_i} Q_V(t) dt$	$V_P = Z_2 - Z_1$	---	$\frac{V_P - V_M}{V_M}$
3 Flüssigkeitszähler mit mechn. Impulsgeber	$f_{Puls} \sim Q_V$	$V_P = \frac{N_Z}{k_V}$	$k_V = \frac{N_Z}{V_M}$	$(V_P - V_M)/V_M$
4 Stromausgang (0/4 ... 20 mA)				
a) Volumenzähler	$i(t) \sim Q_V(t)$	$V_P = \frac{1}{k_V} \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt$	$k_V = \frac{1}{V_M} \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt$	$(V_P - V_M)/V_M$
b) Massezähler	$i(t) \sim Q_m(t)$	$m_P = \frac{1}{k_m} \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt$	$k_m = \frac{1}{m_M} \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt$	$(m_P - m_M)/m_M$
5 Impulsausgang				
a) Volumenzähler	$f_{Puls}(t_i) \sim Q_V(t_i)$	$V_P = \frac{1}{k_V} \cdot N_Z$	$k_V = \frac{N_Z}{V_M}$	$(V_P - V_M)/V_M$
b) Massezähler	$f_{Puls}(t_i) \sim Q_m(t_i)$	$m_P = \frac{1}{k_m} \cdot N_Z$	$k_m = \frac{N_Z}{m_M}$	$(m_P - m_M)/m_M$
6 Digitalausgang (u.a. Feldbus): Signal: Durchfluss				
a) Volumenzähler	$D_A(t_i) \sim Q_V(t_i)$	$V_P = \frac{1}{k_V} \sum_{t_1(i=0)}^{t_2(i=n)} D_A(t_i) \cdot \Delta t$	$k_V = \frac{1}{V_M} \sum_{t_1(i=0)}^{t_2(i=n)} D_A(t_i) \cdot \Delta t$	$(V_P - V_M)/V_M$
b) Massezähler	$D_A(t_i) \sim Q_m(t_i)$	$m_P = \frac{1}{k_m} \sum_{t_1(i=0)}^{t_2(i=n)} D_A(t_i) \cdot \Delta t$	$k_m = \frac{1}{m_M} \sum_{t_1(i=0)}^{t_2(i=n)} D_A(t_i) \cdot \Delta t$	$(m_P - m_M)/m_M$
7 Digitalausgang (u.a. Feldbus) Signal: Totalizer-Ausgang				
a) Volumenzähler	$V_A(t_i) \sim \int_{t_1}^{t_i} Q_V(t) dt$	$V_P = V_A(t_2) - V_A(t_1)$	---	$(V_P - V_M)/V_M$
b) Massezähler	$m_A(t_i) \sim \int_{t_1}^{t_i} Q_m(t) dt$	$m_P = m_A(t_2) - m_A(t_1)$	---	$(m_P - m_M)/m_M$
8 Messwerte der Prüfanlage				
a) gravimetrische Messeinrichtung	$V_M = \frac{\Delta m_W + \Delta K_W}{\rho_{dest}(\vartheta_{FM}) + K_{\rho F}} K_{LA} [1 + K_{\vartheta} + K_p + K_{Kl}] + K_R$			
b) volumetrische Messeinrichtung	$m_M = (\Delta m_W + \Delta K_W) K_{LA} [1 + K_{\vartheta} + K_p + K_{Kl}] + K_R$			
	$V_M = V_{RPS_0} [1 + \gamma_{RPS}(\vartheta_{RPS} - \vartheta_0) + \gamma_F(\vartheta_{FM} - \vartheta_{FRPS}) + \chi_{RPS}(p_{RPS} - p_0) + \chi_T(p_{RPS} - p_{FM})]$			
	$m_M = V_M [\rho_{dest}(\vartheta_{FM}) + K_{\rho F}]$			

Legende:

$D_A(t_i)$	digitalisierter Messwert zum Abtastzeitpunkt t_i
k_V	Kalibrierfaktor in Impulsen je Volumeneinheit
k_m	Kalibrierfaktor in Impulsen je Masseinheit
$m_A(t_i)$	angezeigte Masse (Ausgangssignal) zum Zeitpunkt t_i
m_P	Masseanzeige des Prüflings
m_M	Masse der Flüssigkeit, die während T_M die Messstelle durchströmt
N_Z	Anzahl gezählte Impulse, Anzeige des Zählwerkes
p_0	Bezugsdruck (atmosphärischer Normaldruck)
p_{FM}	Flüssigkeitsdruck an der Messstelle (Prüfling)
p_{RPS}	Druck in der Rohrprüfstrecke
$Q_m(t)$	Massedurchfluss
$Q_V(t)$	Volumendurchfluss
t_1, t_2	Zeitpunkt Beginn bzw. Ende der Messung
$T_M = t_2 - t_1$	Messzeit
$V_A(t_i)$	angezeigtes Volumen (Ausgangssignal) zum Zeitpunkt t_i
V_M	Messvolumen
V_P	Volumenanzeige des Prüflings
V_{RPS_0}	Volumen der Rohrprüfstrecke bei ϑ_0 und p_0
Z_1, Z_2	Zählerstand vor/zu Beginn bzw. nach der Messung
γ_F	Volumenausdehnungskoeffizient der Messflüssigkeit
γ_{RPS}	thermischer Volumenausdehnungskoeffizient des Rohrmaterials der RPS
ϑ_0	Bezugstemperatur
ϑ_{FM}	Temperatur der Flüssigkeit an der Messstelle
ϑ_{FRPS}	Temperatur der Flüssigkeit in der RPS
ϑ_{RPS}	Temperatur des Messrohres der RPS
ρ_W	Wasserdichte
χ_{RPS}	Volumen-Druckdehnungskoeffizient des Rohrmaterials der RPS
χ_T	isothermer Kompressibilitätskoeffizient der Messflüssigkeit

Die unterschiedliche Art der Signalerfassung gemäß Tabelle A.1 ergibt sich grundsätzlich aus der Vielfalt der zur Prüfung bzw. Kalibrierung anstehenden Sensorprinzipien und den vielfältigen Möglichkeiten der nachfolgenden Signalverarbeitung, wie zum Beispiel:

- Wasserzähler mit Anzeige ohne elektrischen/elektronischen Signalausgang
- Wasserzähler bzw. vergleichbare Durchflusssensoren mit Analog- oder Impulsausgang
- Durchflussmessgeräte mit analogem bzw. digitalem Signalausgang
- Durchflussmessgeräte mit integrierendem Signalausgang
- Durchflussmessgeräte mit digitalem Feldbusanschluss; u.a.

Die zu kalibrierende Messgröße kann, wie im Abschnitt 2 dargestellt, der Durchfluss (Volumen- bzw. Massedurchfluss) oder das Volumen bzw. die Masse der strömenden Flüssigkeit (d.h. das Zeitintegral der betreffenden Durchflussgröße über die Messzeit) sein.