

Wägetechnische Aspekte in der Durchflussmessung

EINLEITUNG. Den Messgrößen Durchfluss (Volumen- oder Massedurchfluss) und Volumen und Masse von strömenden Flüssigkeiten und deren exakte messtechnische Erfassung kommt in vielen Branchen der Wirtschaft eine bedeutsame Rolle zu. Gleiches gilt für Anwendungen in Wissenschaft, Medizin und Umwelttechnik. Diese Messgrößen müssen z. B. dort erfasst werden, wo Produktstoffe in flüssiger Form als Handelsgüter mengenmäßig bestimmt werden müssen. Die Spanne der Anwendungen reicht hier z.B. von zu messenden Getränkemengen bzw. flüssigen Lebensmitteln bis zu flüssigen Energieträgern in Form von Heizöl bzw. Kraftstoff für Kraftfahrzeuge; aber auch die Mengemessung von Trinkwasser zählt hierzu.

In verfahrenstechnischen und chemischen Anlagen sind diese Messgrößen die Grundlage für die Herstellung definierter Mengen bzw. Mengenverhältnisse, wodurch bestimmte Produkteigenschaften und die entsprechende Produktqualitäten bestimmt und garantiert werden. Weitere zahlreiche Anwendungen findet man auch in der Energiewirtschaft. Darüber hinaus sind die o.g. Durchflussmessgrößen strömender Flüssigkeiten Gegenstand der Messung und Überwachung in der Medizin und bei der Erfassung von Emissionswerten im Umweltschutz.

Wie bei allen anderen Messgrößen müssen Durchfluss- und Mengemessgeräte vor ihrem Einsatz kalibriert werden. Dies geschieht beim Hersteller oder aber auch bei Dienstleistern mittels Durchfluss-Normalmesseinrichtungen, die auf die jeweiligen nationalen Normale rückgeführt sind.

In Deutschland ist gemäß dem Einheitengesetz der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) die gesetzliche Aufgabe zugewiesen, die gesetzlichen Einheiten darzustellen, aufzubewahren und weiterzugeben. Für diesen Aufgabenbereich wurde in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig das Hydrodynamische Prüffeld errichtet (Abbildung 1). Seit dem Jahr 2003 dient diese Durchfluss-Normalmesseinrichtung als nationales Primärnormal für die Messung und Darstellung der Messgrößen Volumen- und Massedurchfluss sowie Volumen und Masse von strömendem Wasser.

DAS HYDRODYNAMISCHE PRÜFFELD DER PTB. Das im Hydrodynamische Prüffeld realisierte gravimetrische Messprinzip beruht auf der Massebestimmung einer Wassermenge durch Wägung und einer Zeitmessung. Letztere wird aus von den Zuständen einer speziellen Umlenkeinheit (Umschaltklappen bzw. Diverter) abgeleitet, mittels derer die Mengenerfassung im Wägebehälter (Siehe Einzelheiten in Abbildung 1) mechanisch gesteuert wird.

Die prinzipielle Funktionsweise einer gravimetrischen Durchfluss-Normalmesseinrichtung [1] für Flüssigkeiten sei anhand der Schnittdarstellung in Abbildung 1 beschrieben. Das Hydrodynamische Prüffeld der PTB besteht, wie jede gravimetrische Durchfluss-Normalmesseinrichtung, aus den Komponenten zur Durchflusserzeugung und -stabilisierung und den Referenznormalen. Erstere umfassen den Vorratsbehälter, die elektronisch geregelten Pumpen, den Hochbehälter mit Überlaufwehr sowie das Rohrssystem, und da insbesondere die Messstrecken.

Die gravimetrischen Referenznormale werden durch drei Wägesysteme realisiert: 30-t-, 3-t- und 0,3-t-Waage. Mittels dieser drei größengestaffelten Wägesysteme ist eine optimale Anpassung bezüglich der Größen Wägebereich, Messzeit und erreichbare Messunsicherheit möglich. Letztendlich umfasst die Anlage natürlich funktionell auch die jeweiligen Prüflinge, deren Kennwerte durch den Kalibriervorgang bestimmt werden sollen. In der Abbildung 2 sind die beiden Messstrecken des Hydrodynamischen Prüffeldes zu sehen, die jeweils alternativ betrieben werden können und die den Einbau von Durchflussmessgeräten unterschiedlicher Größe erlauben. Des Weiteren sind im Hintergrund die beiden größeren Wägesysteme des Prüffeldes erkennbar.

Die Mess- und Betriebsart, bei der die höchste Genauigkeit bei der Kalibrierung erzielt wird und die auch in der Messanlage der PTB zur Anwendung kommt, ist die statische Wägung mit fliegendem START-STOPP-Betrieb. Bei dieser Betriebsweise wird vor und während der Messung die Messflüssigkeit kontinuierlich in einem geschlossenen Kreislauf bewegt.

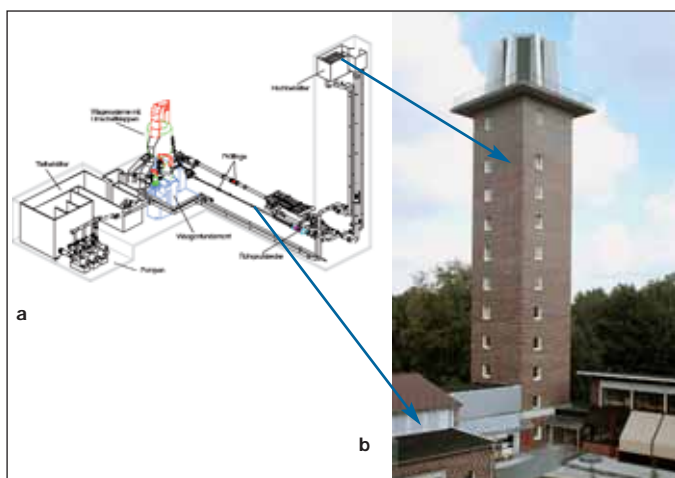


Abb. 1:

- a) Prinzipdarstellung der Anlage des Prüffeldes ohne Gebäude
- b) Der Willy-Wien-Turm der PTB (im 9. Stockwerk des Turmes ist der Hochbehälter des Prüffeldes mit einem Überlaufwehr auf einer Höhe von 35 m untergebracht)



Abb. 2:
Blick in die Messhalle des Hydrodynamischen Prüffeldes der PTB
(im Hintergrund sind das 3-t- bzw. das 30-t-Wägesystem zu erkennen)

Bei höheren Anforderungen an die Messunsicherheit wird dabei der Wasserkreislauf über den Hochbehälter dieser Anlage betrieben, der im 9. Stockwerk des Willy-Wien-Turms der PTB installiert ist. D.h., von den Pumpen wird die Flüssigkeit aus dem Vorratsbehälter in den Hochbehälter gefördert, eine Teilmenge läuft über das Wehr zurück in den Tiefbehälter. Der größere Teil jedoch strömt über die Messstrecke durch den Prüfling und dann über den Diverter zurück in den Vorratsbehälter. Durch die Höhe der Überlaufkante im Hochbehälter bei ca. 35 m Höhe 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 Hochbehälter mit Überlaufwehr dient zusätzlich zu der elektronischen Durchflussregelung zur hoch genauen Stabilisierung des Durchflusses.

Der eigentliche Messvorgang wird dadurch gestartet, dass die Umschaltklappe von der Bypass-Position in die Umlenkposition zum Wägebehälter geschaltet wird. Beim Durchgang durch den Flüssigkeitsstrahl wird in der Mittenposition der Umschaltklappe die Erfassung der Messsignale des Prüflings sowie die Erfassung der Messzeit mittels elektronischem Zähler gestartet. Nach Erreichen einer vorgegebenen Messmenge im Wägebehälter wird der Diverter wieder in seine Ausgangslage zurückgeschaltet. Bei diesem Durchgang durch die Strahlmitte werden die Erfassung der Prüflingausgangssignale und die Zeitmessung 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 betreffenden Durchflussmessgerätes (die Messgerätekenngröße, die die statische Messwandlercharakteristik definiert) und der (mittleren) Durchflusswert als zu bestimmende Messgrößen des Kalibriervorganges berechnet. Die Anlagenkenngrößen des Prüffeldes sind als Übersicht in Tabelle 1 dargestellt. Strategisch wichtige Charakteristika sind der Variationsbereich des einstellbaren Volumenstromes und die dabei erzielbare erweiterte Messunsicherheit von

Tabelle 1 Charakteristika des Hydrodynamischen Prüffeldes

Anlagenkenngröße	Einzelheit	Charakteristika
Messgrößen:	Volumendurchfluss Massestrom Volumen Masse	Durchflussmessgeräte und Volumen- bzw. Massezähler
Messart:	fliegender START / STOPP	Steuerung über: Umschaltklappe
Bezugsnormale:	Gravimetrische Messung	Waagen: 30 t 3 t 0,3 t
Betriebsarten:	Betrieb mit Hochbehälter Pumpen-Direkt-Betrieb	Konstanter Druck in der Messstrecke (ca. 0,35 MPa) Variabler Druck in der Messstrecke (bis ca. 6 bar)
Nennweiten:	Messstrecke A / B	DN 20 ... DN 400
Durchflussbereich:	Messstrecke A / B	0,3 m³/h ... 2100 m³/h
Erweiterte Messunsicherheit:	0,02 %	(Betrieb mit Hochbehälter)

0,02 %. Mit diesem niedrigen Wert nimmt das Hydrodynamische Prüffeld der PTB weltweit eine vordere Position ein [2].

DAS GRAVIMETRISCHE NORMAL DES HYDRODYNAMISCHEN PRÜFFELDES. Alle Komponenten des Prüffeldes wurden in der Art konzipiert und gebaut, dass deren individuelle Messunsicherheitsbeiträge vorgegebene projektierte Werte realisieren, die wiederum für die gesamte erweiterte Messunsicherheit der Anlage einen Wert besser als den o.g. Wert von 0,02 % garantieren. Von diesem entscheidenden Entwurfskriterium wurden die konstruktiven, funktionellen sowie unsicherheitsbestimmenden messtechnischen Anforderungen an die Wägeeinrichtungen des gravimetrischen Referenznormals, als zentrale Komponente der Normalmesseinrichtung, abgeleitet.



Kompetenz in Schüttgut

- ▶ **Fördern mit flexiblem EMDE-LIFT**
- ▶ **Verdichten leerer Säcke und Big-Bags (FIBC)**
- ▶ **Saubere Sackentleerung**
- ▶ **Sicheres Entleeren von Big-Bags (FIBC)**
- ▶ **Leistungsfähiges und eichgenaues Abfüllen in Big-Bags**
- ▶ **Effektive Austragshilfen für Silos, Trichter und Behälter**
- ▶ **Schlüsselfertige Wäge- und Dosieranlagen**
- ▶ **Ex-geschützte Anlagen nach Richtlinie 94/9/EG für den Staub- und Gas-Ex-Bereich**
- ▶ **EMKOM Kompensatoren, hochflexibel, temperaturfest, aus FDA-zugelassenem Material und für den Ex-Bereich**



EMDE Industrie-Technik GmbH ♦ Koppelheck ♦ D-56377 Nassau
Tel: +49 (0) 26 04-97 03-0 ♦ Fax: +49 (0) 26 04-97 03-33 ♦ www.emde.de

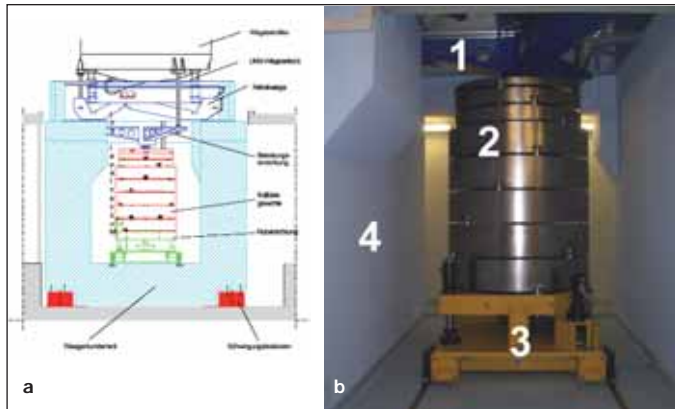


Abb. 3: Das 30-t-Wägesystem

- a) Seitliche Schnittdarstellung der Waage
- b) Die Kalibriergewichte der 30-t-Waage mit der automatischen Belastungseinrichtung:
 - 1) Aufhängevorrichtung für Kalibriergewichte
 - 2) Kalibriermassenstücke
 - 3) Belastungseinrichtung
 - 4) Waagenfundament

Die drei Wägesysteme des Hydrodynamischen Prüffeldes weisen grundsätzlich das gleiche Funktionsprinzip auf: Sie kombinieren jeweils zwei von einander unabhängige Waagenanordnungen, die physikalisch unterschiedliche Messprinzipien nutzen, und sie sind zusätzlich jeweils mit einer integrierten Kalibriereinrichtung ausgestattet [3].

Dieser grundsätzliche Aufbau der Wägeeinrichtungen wird in Abbildung 3 anhand des 30-t-Wägesystems veranschaulicht. Abbildung 3a zeigt die seitliche Schnittdarstellung. Diese Ansicht zeigt die wichtigsten Teilkomponenten: Waagenfundament, auf der die Kombination von «klassischer» Hebelwaage mit elektromagnetischer kraftkompensierender Wägezelle und Kraftaufnehmern mit Dehnungsmessstreifen als Sensorelementen platziert sind. Darüber ist der Wägebehälter zur Mengenummessung teilweise erkennbar und darunter die Einrichtung mit den Kalibriergewichten. Abbildung 3b zeigt die Massenscheiben, die zur Kalibrierung der 30-t-Waage dienen: 1 Stück á 1 t, 2 Stück á 2 t und 5 Stück á 5 t.

Die Kennwerte der drei Wägesysteme sind in Tabelle 2 dargestellt. Diese ergaben sich aus den projektierten Durchflussmessbereichen sowie aus den Anforderungen bezüglich der geplanten Messunsicherheit der Gesamtanlage und den daraus abgeleiteten individuellen Anforderungen für die jeweiligen Subsysteme. Die aufgelisteten Parameter konnten im Rahmen der Abnahmemessungen erfolgreich nachgewiesen werden.

Die drei Wägesysteme, deren Spezifikationen in Tabelle 2 aufgelistet sind, repräsentieren bezüglich der Wägebereiche ein gestaffeltes System gravimetrischer Referenznormale, mit denen lückenlos der Durchflussmessbereich der Anlage von 0,3 m³/h bis maximal 2100 m³/h bei vorgegebener Messunsicherheit abgedeckt werden kann.

ANWENDUNGSBEZOGENE ANFORDERUNGEN AN DIE WÄGEEINRICHTUNGEN IN DURCHFLUSSKALIBRIERANLAGEN. Die in Tabelle 2 aufgelisteten Charakteristika der drei Wägesysteme beinhalten Anforderungen, die

Tabelle 2 Spezifikation der Wägesysteme des Hydrodynamischen Prüffeldes

30-t-Waage:	Höchstlast für Messungen	30 t
	Mindestlast	3 t
	Wägebereich	3 ... 30 t
	Belastbarkeit, inkl. Tara	45 t
	dd	10 g
	zul. rel. Fehlergrenzen im Wägebereich (v. MW)	±3·10 ⁻⁵
	rel. Standardabweichung im Wägebereich (v. MW)	1·10 ⁻⁵
	erweiterte rel. Messunsicherheit im Wägebereich	5·10 ⁻⁵
3-t-Waage:	Höchstlast für Messungen	3000 kg
	Mindestlast	300 kg
	Wägebereich	300 ... 3000 kg
	Belastbarkeit, inkl. Tara	4500 kg
	dd	1 g
	zul. rel. Fehlergrenzen im Wägebereich (v. MW)	±3·10 ⁻⁵
	rel. Standardabweichung im Wägebereich (v. MW)	1·10 ⁻⁵
	erweiterte rel. Messunsicherheit im Wägebereich	5·10 ⁻⁵
0,3-t-Waage:	Höchstlast für Messungen	300 kg
	Mindestlast	15 kg
	Wägebereich	15 ... 300 kg
	Belastbarkeit, inkl. Tara	450 kg
	dd	0,1 g
	zul. rel. Fehlergrenzen im Wägebereich (v. MW)	±3·10 ⁻⁵
	rel. Standardabweichung im Wägebereich (v. MW)	5·10 ⁻⁶
	erweiterte rel. Messunsicherheit im Wägebereich	5·10 ⁻⁶

Legende: dd Auflösung der Waagenanzeige
v. MW vom Messwert

unter «normalen», rein statischen Messbedingungen an die Wägesysteme zu stellen sind. Die prozessspezifischen Randbedingungen beim Einsatz von Präzisionswägesystemen als gravimetrische Referenzen in Durchfluss-Normalmessenrichtungen sind durch zwei Besonderheiten gekennzeichnet:

- 1) Der Wägeprozess, obwohl als statische Wägung mit fliegendem START-STOPP klassifiziert, impliziert beträchtliche Anforderungen bezüglich der dynamischen Einschwingvorgänge der komplexen Waagenanordnung. Diese resultieren daraus, dass jeder Befüllvorgang während einer Durchflussmessung eine rampenförmige Zeitfunktion als Systemanregung darstellt. Das wiederum erfordert eine dynamische Systemauslegung in der Hinsicht, dass die in Tabelle 2 spezifizierte kleinste Anzeigeeinheit dd nach möglichst kurzer Einschwingzeit zur Anzeige gebracht wird bzw. für die Messwertverarbeitung bereitgestellt wird.
- 2) Während einer Durchflussmessung werden in Abhängigkeit von dem jeweils eingestellten Durchflussmessbereich, bedingt durch die dynamischen Reaktionskräfte der bewegten Wassermassen, Erschütterungen auf den gesamten Baukörper der Anlage übertragen. Diese dynamischen Störkräfte überdecken einen weiten Frequenzbereich und würden ohne die Anwendung spezieller schwingungsdämpfender Maßnahmen zu einer fehlerhaften Anzeige führen [4].

Zur Lösung dieser Problematik wurden die Wägesysteme auf einem schwingungsgedämpften Betonfundament errichtet (siehe Abbildung 3a). Die schwingungsdämpfende Wirkung des Gesamtsystems wird durch eine Kombination passiver und aktiver Systemkomponenten realisiert.

Die passive Schwingungsdämpfung bezüglich des von außen auf die Waagenanordnung wirkenden Störschwingungsspektrums wird durch die Kombination eines großen Massekörpers mit einer Anordnung von gedämpftem Federelementen technisch realisiert. Diese Schwingungsisolatoren bilden zusammen mit dem Betonfundamentkörper ein passives Schwingungsdämpfungssystem. Ein elektronisches Regelsystem mit hoch auflösenden Wegsensoren realisiert zusätzlich ein Niveau- und Lageregelungssystem, bei dem die Schwingungsisolatoren als pneumatische Aktoren genutzt werden. Diesem quasistatischen Niveauregelungssystem ist zusätzlich ein dynamisch schnelles Regelsystem funktionell überlagert. Dieses schnell-



Abb. 4:

- a) Waagenfundament im Rohbauzustand
b) pneumatische Schwingungsisolatoren unter dem Waagenfundament

le Regelsystem nutzt die von Geschwindigkeitssensoren auf dem Betonfundament aufgenommenen Signale, um über elektrische Aktoren an 4 Eckpunkten des Fundaments durch Störungsanregung verursachte schnelle Lageänderungen des Waagenfundaments auszuregulieren. Für diesen Zweck kommen mehrachsige Linearantriebe in Kombination mit einer Gruppe von selbstoptimierenden Reglern zur Anwendung. Durch diese elektronischen Komponenten wird eine Systemdynamik realisiert, die in ihrer Wirkung einer größeren dämpfenden Masse entspricht. Aufgrund der Bandbreite der durch die bewegten Wassermassen verursachten mechanischen Störschwingungen, wäre eine möglichst große «träge» Masse als Waagenfundament wünschenswert. Der Größe dieses Masse-

körpers war durch die Verfügbarkeit entsprechender räumlicher Gegebenheiten und letztendlich auch wesentlich durch die finanziellen Rahmenbedingungen Grenzen gesetzt, so dass zu der beschriebenen elektronischen Lösung gegriffen wurde.

Nicht vergessen darf man, dass das im Wägebekälter zur Messung aufgefangene Wasser im Zusammenwirken mit dem Wägebekälter ein nur schwach gedämpftes schwingungsfähiges System darstellt, dessen abklingende Wellenbewegung als zusätzlich dynamische Eingangs- bzw. Störgröße im jeweiligen Wägesystem wirkt.

Das Zusammenwirken der einzelnen Komponenten der 3 Wägesysteme wurde in der Weise optimiert, dass eine effektive Dämpfung aller Störschwingungen bei möglichst kurzer Einschwingzeit der Waagen erzielt wird. Da aufgrund insbesondere der geometrischen Abmessungen der Wägebekälter eine untere Eigenfrequenz von höchstens 2 Hz im Rahmen von Auslegungs- und dynamischen Simulationsrechnungen bestimmt worden war, waren bereits mit der Auslegung des gesamten Wägesystems entsprechende Vorkehrungen getroffen worden, um auch bei einer derart niedrigen Frequenz der Störangeregung eine ausreichende Schwingungsdämpfung zu gewährleisten.

Die Abbildungen 4a und 4b zeigen das Waagenfundament in seinem Rohzustand vor Fertigstellung des Hallenbodens bzw. die Schwingungsisolatoren unter dem Waagenfundament.










Vienna-tec®

Internationale Fachmesse
für die Industrie

7. – 10.10.2008

Messe Wien

www.vienna-tec.at



Mit der U-Bahn U2 direkt zur VIENNA-TEC
STATIONEN
MESSE/PRATER
UND KRIEAU



Eine Veranstaltung der
Reed Exhibitions®
Messe Wien

Schwerpunkt
Arbeitsschutz:

mensch
arbeit
sicherheit



Abb. 5: 3-t-Waage mit Durchflussumschalteinrichtung (hervorgehoben durch kreisförmigen Marker)

SYSTEMINTEGRATION DER WÄGESYSTEME IN DAS PROZESSLEITSYSTEM DES HYDRODYNAMISCHEN PRÜFFELDES.

Das jeweilige Wägesystem realisiert mit der ihm zugeordneten Umschalteinrichtung, dem Diverter, eine funktionelle und konstruktive Einheit (Abbildung 5). Für die Funktion der gesamten Durchfluss-Normalmesseinrichtung ist die optimale funktionelle Einbindung der Wägeeinheiten in das Gesamtsystem der Messanlage eine unabdingbare Voraussetzung. Dies wurde durch eine Gestaltung der Prozessleittechnik der Gesamtanlage realisiert. So existiert für jede der drei Waagen eine entsprechend gestaltete Bildschirmdarstellung, die alle messtechnisch notwendigen Komponenten des Subsystems «Waage-Diverter» visualisiert.

Zusätzlich präsentiert diese Visualisierung auch die Messwerte für die Umgebungsgrößen, die für den durch die Umgebungsluft verursachten Auftrieb der zu wägenden Wassermenge ursächlich verantwortlich sind. Die für die Korrektur des Luftauftriebs notwendigen Werte von Lufttemperatur, atmosphärischer Luftdruck und relative Luftfeuchte werden dort visualisiert und werden dem funktionell übergeordneten Prozessleitsystem für die weitere Messdatenaufbereitung und Verarbeitung zur Verfügung gestellt (Abbildung 6). Aus dieser Displaydarstellung heraus sind auch alle Funktionen dieses Systems mit der von Windows-basierten Rechnern bekannten Bedienphilosophie bedienbar. U.a. wird aus dieser Bilddarstellung auch der Kalibriervorgang des jeweiligen Waagensystems initiiert. Die bei dieser Kalibrierung gewonnenen waagenbezogenen Messdaten werden in der zentralen Echtzeit-Prozessdatenbank des Anlagenprozessleitsystems abgelegt und stehen dann für die Auswertung der Durchflussskalibrierung zur Verfügung.

Diese Waagenkalibrierungen, die an allen Tagen, an denen hochgenaue Durchflussskalibrierungen durchgeführt werden, vor den Durchflussmessungen ausgeführt werden, dienen auch zur Datengewinnung für ein qualifiziertes Qualitätsmanagement. So wird damit ständig die Einhaltung der in Tabelle 2 ausgewiesenen relevanten Grenzwerte und deren Langzeitstabilität überwacht.

ZUSAMMENFASSUNG. Durchfluss-Normalmesseinrichtungen höchster Genauigkeit basieren im Allgemeinen auf der Nutzung gravimetrischer Referenznormale. Im Hydrodynamischen Prüffeld der PTB kommen Wägesysteme zum Ein-

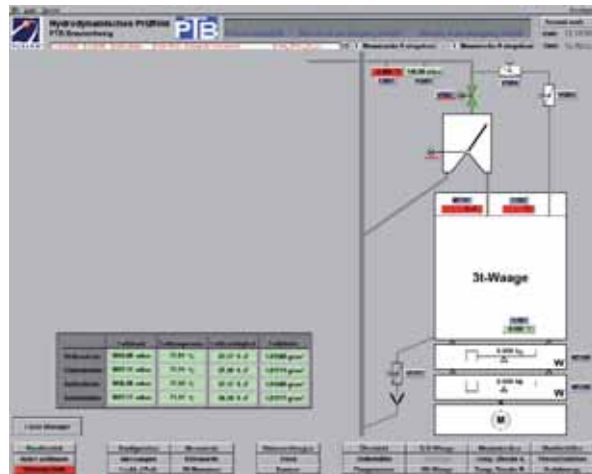


Abb. 6: Visualisierung der 3-t-Wägeeinheit mit seinen Funktionseinheiten im Prozessleitsystem des Prüffeldes

satz, die in einzigartiger Weise durch die Kombination hoch genauer Waagen mit integrierten Kalibriereinrichtungen sowie dedizierten Störungsdämpfungsmaßnahmen eine herausragend niedrige Messunsicherheit von 0,02 % bei der Durchflussskalibrierung von Flüssigkeitsmessgeräten realisieren.

Die funktionelle Komplexität einer derartigen Messanlage setzt einen hohen Automatisierungsgrad voraus. Die dabei notwendigerweise zum Einsatz kommenden Rechner sind darüber hinaus die Basis für die Qualitätssicherung aller Messprozesse im Prüffeld. Dies trifft im besonderen Maße auf die Wägesysteme der gravimetrischen Normale zu, da diese dominierend die Messunsicherheit der gesamten Messanlage definieren. Auf der Basis der regelmäßig erfassten Daten und deren ständige Überwachung können rechtzeitig Abweichungen von der «normalen» Funktionalität erkannt und gegebenenfalls Wartungs- oder Reparaturmaßnahmen eingeleitet werden. Nur dadurch kann die Messunsicherheit zuverlässig und glaubhaft bei allen Messungen gewährleistet werden. ↩

AUTOR. Rainer Engel, PTB Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig, D-38116 Braunschweig
www.ptb.de/de/org/1/15/152/_index.htm

LITERATUR. [1] W. Poeschel, R. Engel: The concept of a new primary standard for liquid flow measurement at PTB Braunschweig, 9th International Conference on Flow Measurement FLOMEKO '98, proceedings, pp. 7-12, Lund, Sweden, June 15-17, 1998.

[2] BIPM: Calibration and Measurement Capabilities (CMCs) der nationalen Metrologieinstitute. <http://www.bipm.org>.

[3] R. Engel, H.-J. Baade: New-Design Dual-Balance Gravimetric Reference Systems with PTB's New «Hydrodynamic Test Field», 11th International Conference on Flow Measurement FLOMEKO 2003, Groningen, The Netherlands, May 12-14, 2003.

[4] S. Maas, R. Nordmann, M. Pandit: Die Kopplung von elektrischen und mechanischen Schwingungen in einem Meßsystem, VDI-BERICHT Nr. 978, 1992.