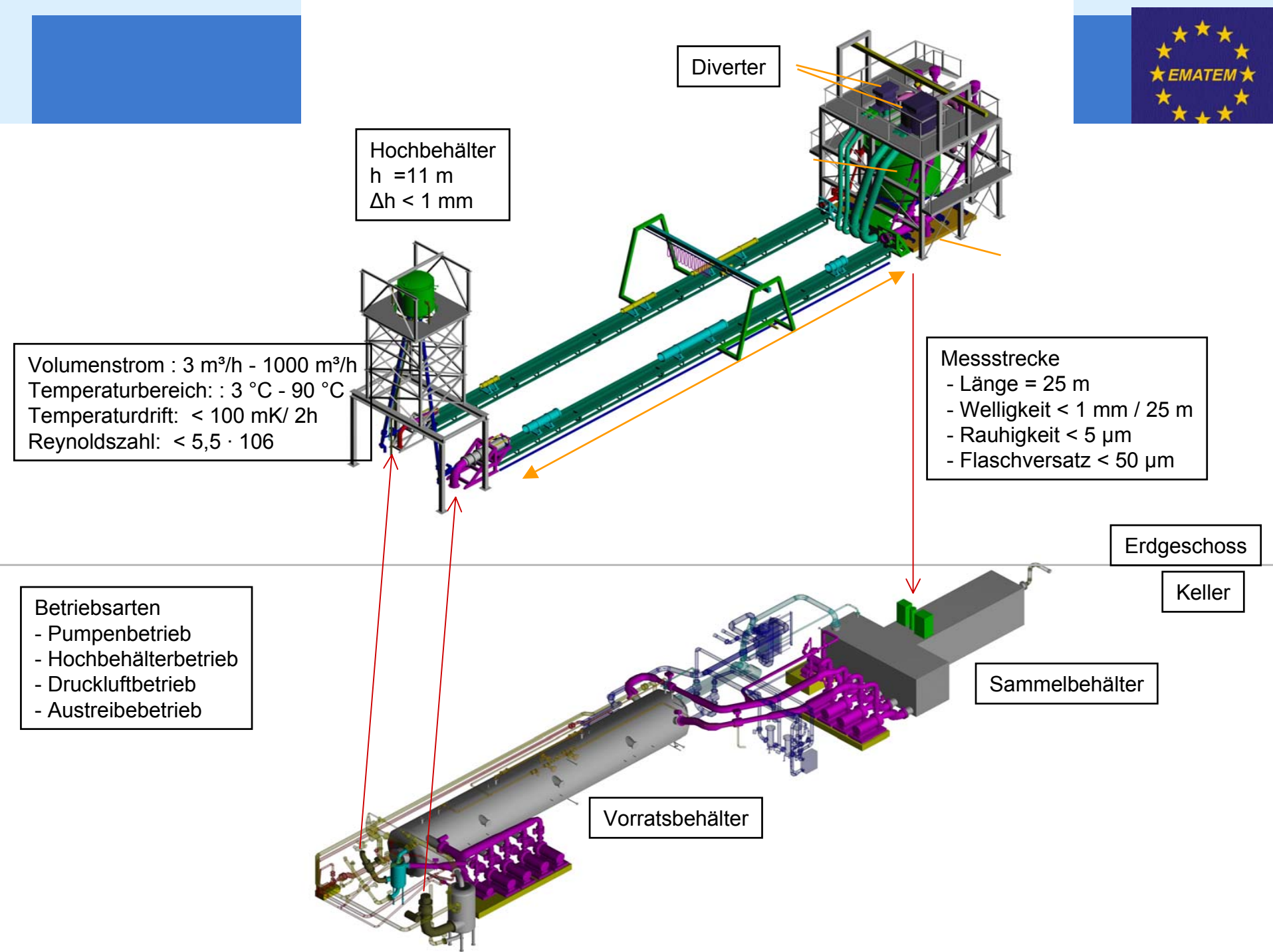
Messunsicherheitsbudget der Messanlage für Wärme- und Klimakältezähler der PTB in Berlin

N. Mathies PTB, Berlin

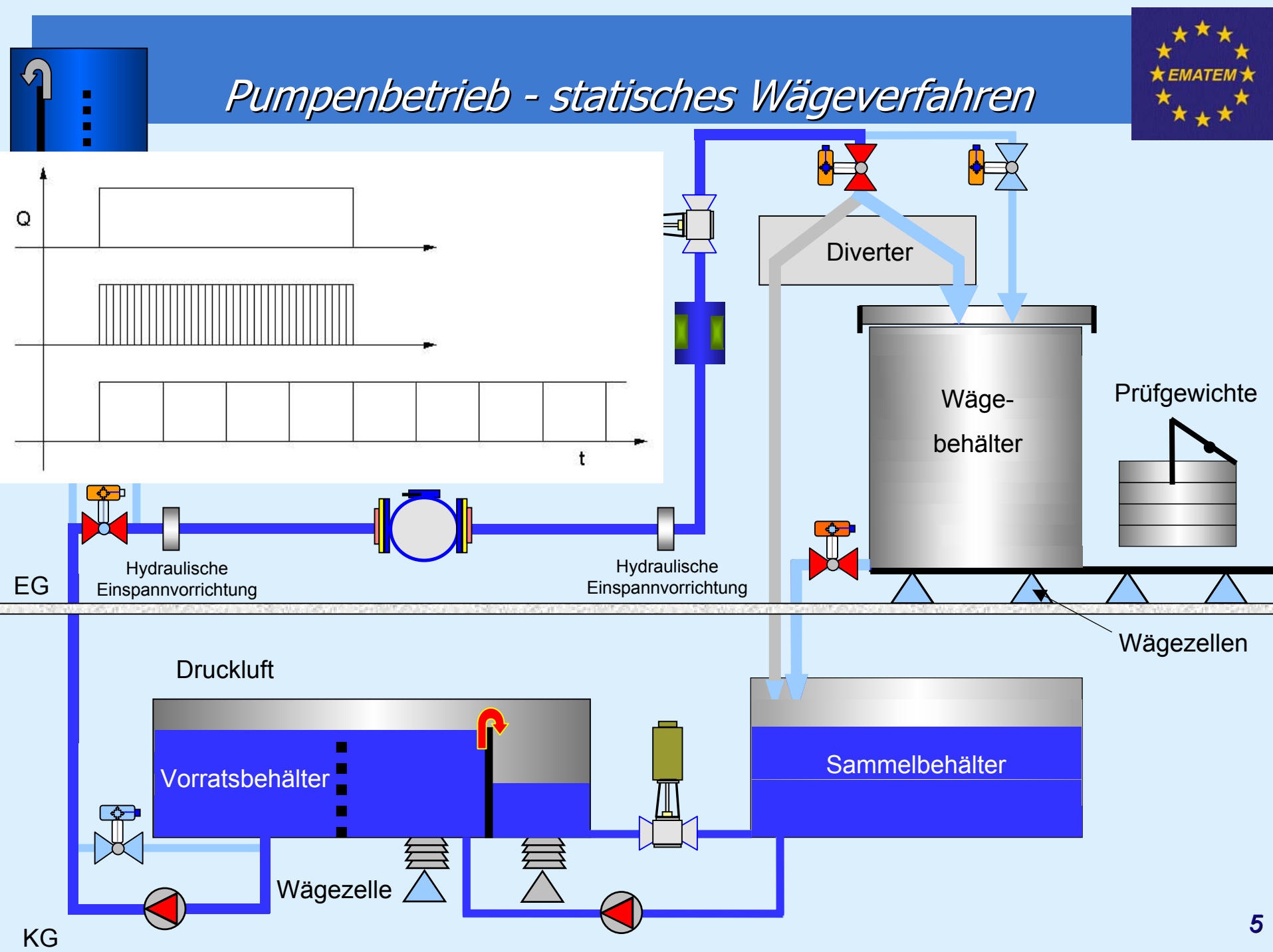
Inhalt

- Versuchsanlage
- Messunsicherheitsbudget
- Wägesystem
- Diverter
- Dichte des Wassers
- Zusammenfassung und Ausblick


Diverter
Hochbehälter
h =11 m
Δh < 1 mm
Volumenstrom : 3 m³/h - 1000 m³/h
Temperaturbereich: : 3 °C - 90 °C
Temperaturdrift: < 100 mK/ 2h
Reynoldszahl: < 5,5 · 106
Messstrecke
- Länge = 25 m
- Welligkeit < 1 mm / 25 m
- Rauhigkeit < 5 µm
- Flaschversatz < 50 µm
Erdgeschoss
Keller
Betriebsarten
- Pumpenbetrieb
- Hochbehälterbetrieb
- Druckluftbetrieb
- Austreibebetrieb
Sammelbehälter
Vorratsbehälter

Neue Messanlage im Hermann-von-Helmholtz Bau

Pumpenbetrieb - statisches Wägeverfahren



Inhalt

- Versuchsanlage
- Messunsicherheitsbudget
- Wägesystem
- Diverter
- Dichte des Wassers
- Zusammenfassung und Ausblick

Messabweichung und zugehöriger Unsicherheit

Messabweichung nach [GUM]:

$$MA_{\mathrm{Pr}} = \frac{V_{ist} - V_{soll}}{V_{soll}}$$

V_{ist} Anzeige des Prüflings

V_{soll} mit Normal (Waage) ermittelter Wert

Messunsicherheit:

$$u_{MA\,\mathrm{Pr}}{}^2 = \left(\frac{1}{V_{soll}}\right)^2 u_{Vist}{}^2 + \left(\frac{V_{ist}}{V_{soll}{}^2}\right)^2 u_{Vsoll}{}^2 \quad \Rightarrow \quad u_{MA\,\mathrm{Pr}}{}^2 = \left(\frac{1}{V_{soll}}\right)^2 u_{Vsoll}{}^2$$

Modell für Volumenbestimmung

Sollvolumen (Prüfling):

$$V_{soll} = \frac{\Delta G\left(1 - \frac{\rho_{Lu}}{\rho_N}\right)}{\left(\rho_{W2} - \rho_{L2}\right)} + \Delta V_U + \Delta V_R + \Delta V_T + \Delta V_L$$

9 Eingangsgrößen !

ΔG	Differenz der Wägewerte (G2 - G1)
ρ_{Lu}	Dichte der Umgebungsluft
ρ_N	Dichte der Normalgewichte
ρ_{W2}	Dichte des Wassers nach dem Füllvorgang
ρ_{L2}	Dichte der Luft nach dem Füllvorgang
ΔV_U	Einfluss der Umschalteinrichtung (Diverter)
ΔV_R	Einfluss der Rohrleitungsdimension bei Temperaturänderung während einer Prüfung
ΔV_T	Einfluss verschiedener Temperaturniveaus von Prüfling und Mastermeter
ΔV_L	Einfluss von Luftblasen im Rohrsystem bei gleichzeitiger Temperaturänderung

$$u_{Vsoll}^{\ 2} = \left(\frac{\partial V_{soll}}{\partial \Delta G}\right)^2 u_{\Delta G}^{\ 2} + \left(\frac{\partial V_{soll}}{\partial \rho_{Lu}}\right)^2 u_{\rho Lu}^{\ 2} + \left(\frac{\partial V_{soll}}{\partial \rho_N}\right)^2 u_{\rho N}^{\ 2} + \left(\frac{\partial V_{soll}}{\partial \rho_{W2}}\right)^2 u_{\rho W2}^{\ 2} + \left(\frac{\partial V_{soll}}{\partial \rho_{L2}}\right)^2 u_{\rho L2}^{\ 2}$$

$$+ \left(\frac{\partial V_{soll}}{\partial \Delta V_U}\right)^2 u_{\Delta VU}^{\ 2} + \left(\frac{\partial V_{soll}}{\partial \Delta V_R}\right)^2 u_{\Delta VR}^{\ 2} + \left(\frac{\partial V_{soll}}{\partial \Delta V_T}\right)^2 u_{\Delta VT}^{\ 2} + \left(\frac{\partial V_{soll}}{\partial \Delta V_L}\right)^2 u_{\Delta VL}^{\ 2}$$

Gesamtmessunsicherheit

Eingangs-größe	Wert	Messunsicherheit (Normalverteilung)	Sensitivitäts-koeffizient für 20 m³	Beitrag zur Messunsicherheit in m³
ΔG	20 000 kg	0,0289 kg	$1{,}0 \cdot 10^{-3}$ m³/kg	$2{,}89 \cdot 10^{-5}$
ρ_{Lu}	1,2 kg/m³	0,00289 kg/m³	$2{,}5 \cdot 10^{-3}$ (m³)²/kg	$7{,}22 \cdot 10^{-6}$
ρ_N	8000 kg/m³	0,173 kg/m³	$3{,}4 \cdot 10^{-7}$ (m³)²/kg	$5{,}88 \cdot 10^{-8}$
ρ_{W2}	1000 kg/m³	0,0577 kg/m³	0,02 (m³)²/kg	$1{,}15 \cdot 10^{-3}$
ρ_{L2}	0,9 kg/m³	0,0144 kg/m³	0,02 (m³)²/kg	$2{,}89 \cdot 10^{-4}$
ΔV_U	13 ms (bei 1000 m³/h)	0,00382 m³	1	$3{,}82 \cdot 10^{-3}$
ΔV_R	$\leq 1{,}87 \cdot 10^{-4}$ m³	$3{,}7 \cdot 10^{-5}$ m³	1	$3{,}74 \cdot 10^{-5}$
ΔV_T	$\leq 2{,}05 \cdot 10^{-4}$ m³	$4{,}1 \cdot 10^{-5}$ m³	1	$4{,}10 \cdot 10^{-5}$
ΔV_L	$\leq 3{,}70 \cdot 10^{-5}$ m³	$7{,}4 \cdot 10^{-6}$ m³	1	$7{,}40 \cdot 10^{-6}$

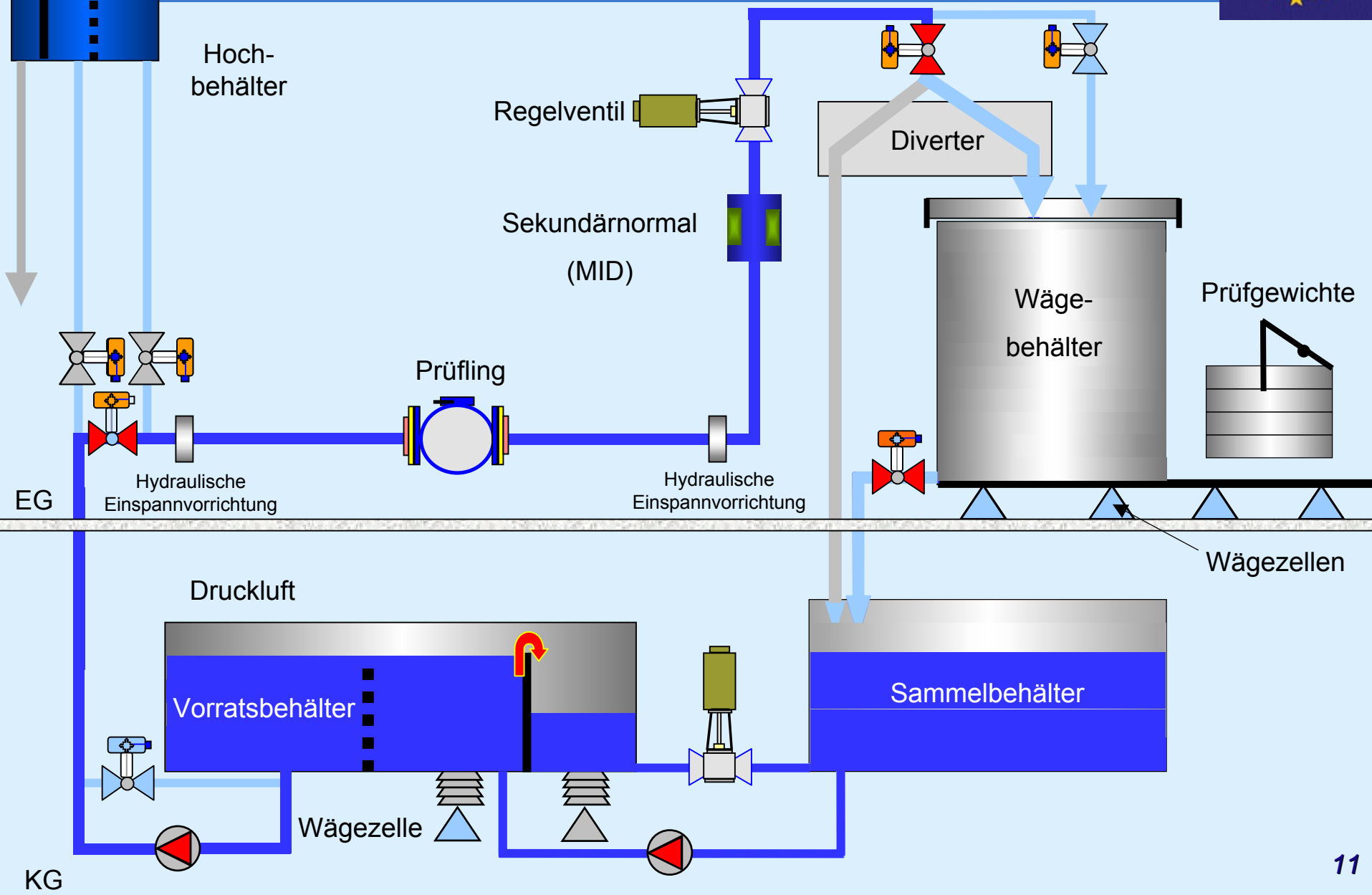
absolute kombinierte Messunsicherheit (k=1) **$4{,}0 \cdot 10^{-3}$ m³**

relative erweiterte Messunsicherheit (k=2) **$4{,}0 \cdot 10^{-4}$ (=0,04%)**

Inhalt

- Versuchsanlage
- Messunsicherheitsbudget
- Wägesystem
- Diverter
- Dichte des Wassers
- Zusammenfassung und Ausblick

Pumpenbetrieb - statisches Wägeverfahren



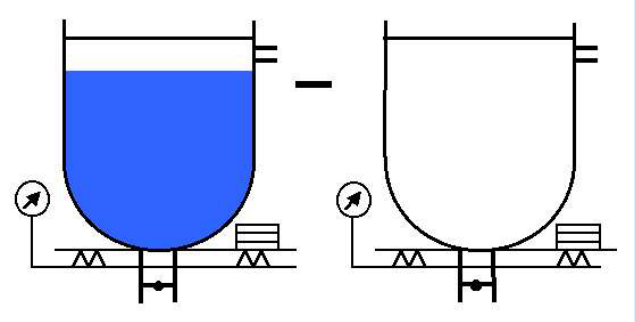
Messunsicherheit der Waage

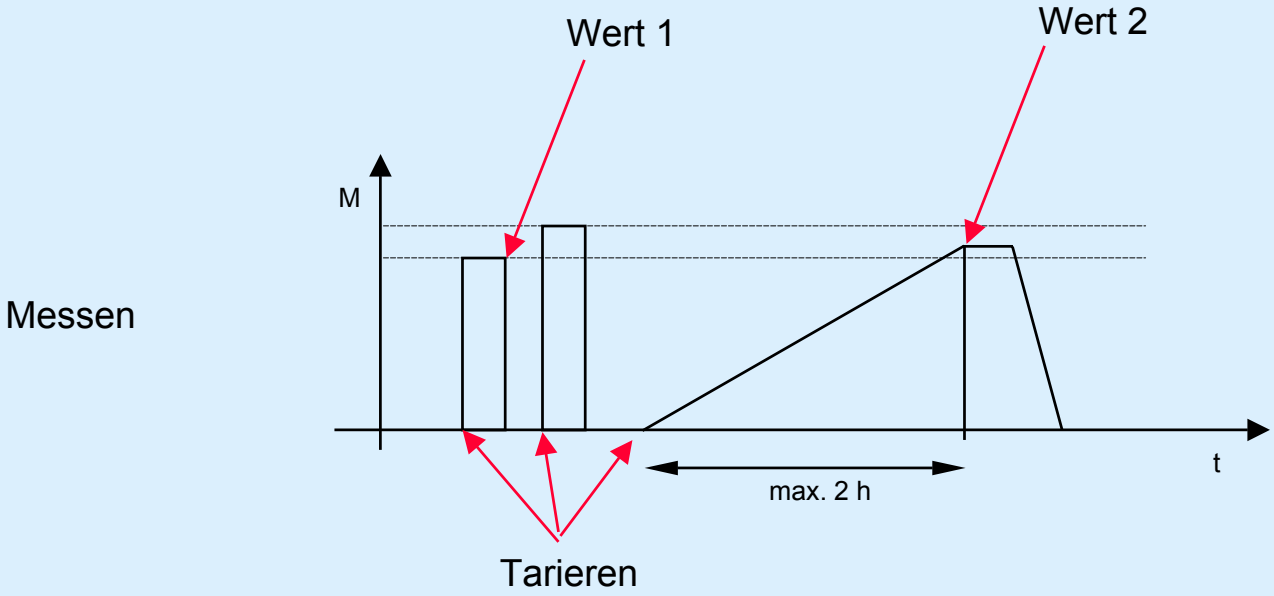
Wägewert ΔG :

$\Delta G = (G_2 - G_1) \approx 20.000$ kg

$u_{\Delta G} = 1\ 10^{-5} = 0{,}200$ kg

(Rechteckverteilung)





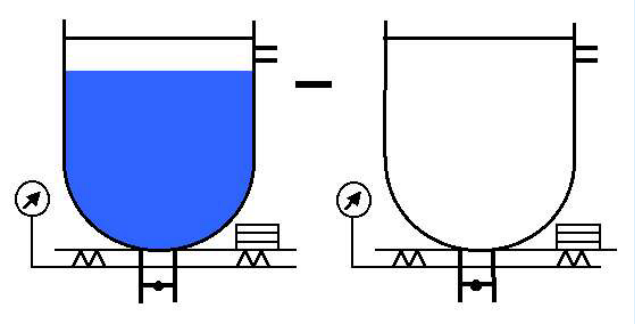
Messunsicherheit der Waage

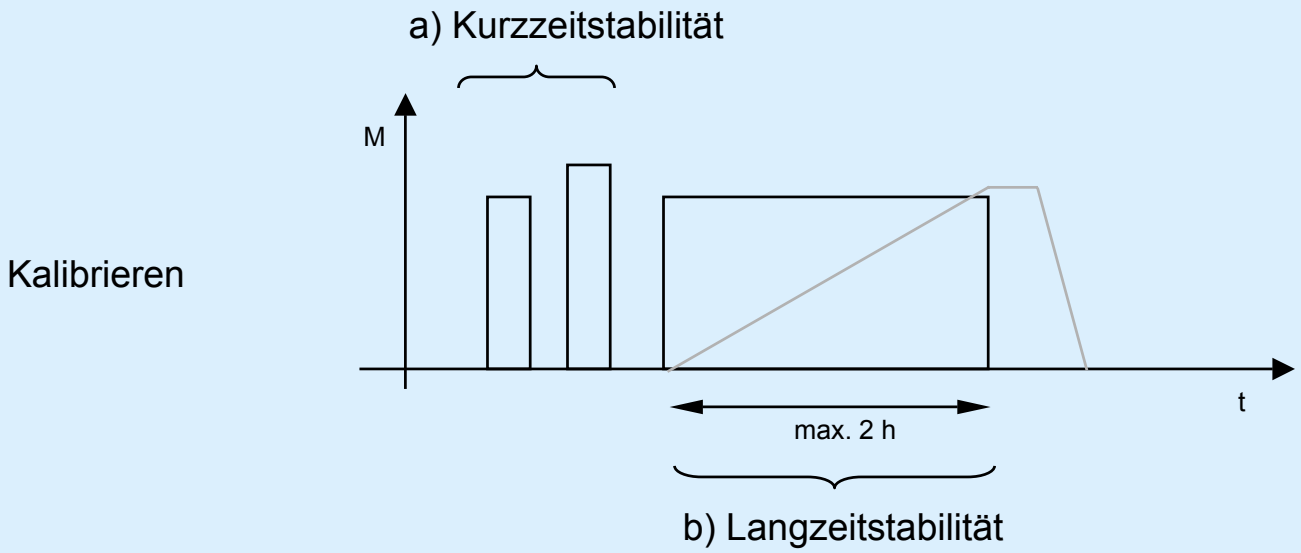
Wägewert ΔG :

$\Delta G = (G_2 - G_1) \approx 20.000$ kg

$u_{\Delta G} = 1\ 10^{-5} = 0{,}200$ kg

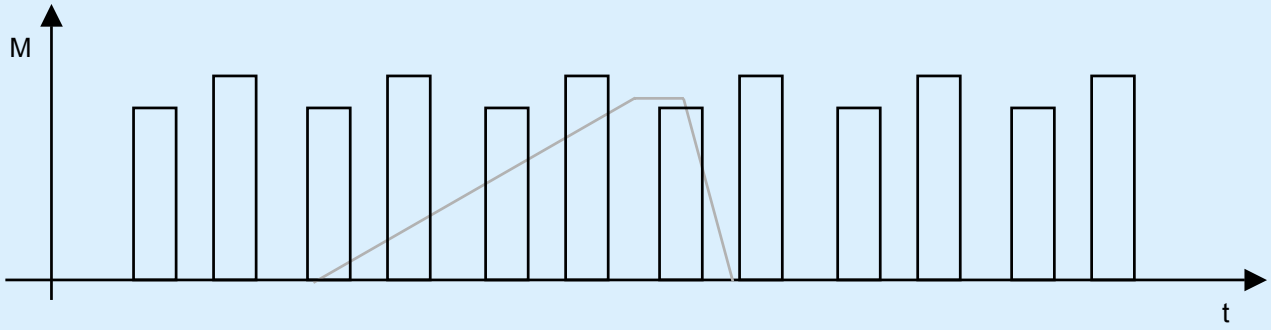
(Rechteckverteilung)





Messunsicherheit der Waage

a) Kurzzeitstabilität

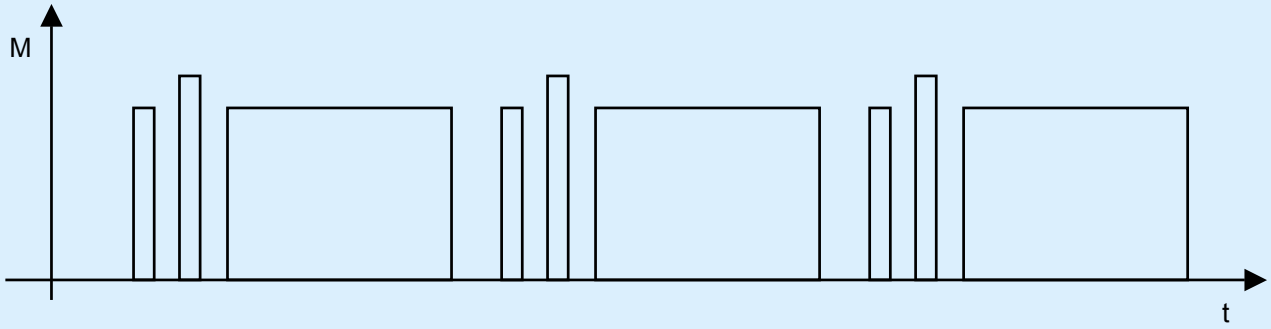


Mehrere Wiederholungsmessungen in Folge, bei trockenem Wägebehälter:

Gewicht in kg	Anzahl der WDH Messungen	Standardab-weichung der Einzelmessung (k=2) in kg	Maximal zulässige Standardab-weichung in kg
10057,820	15	0,105	0,160
15643,165	14	0,157	0,210
19555,253	14	0,262	0,260

Messunsicherheit der Waage

b) Langzeitstabilität

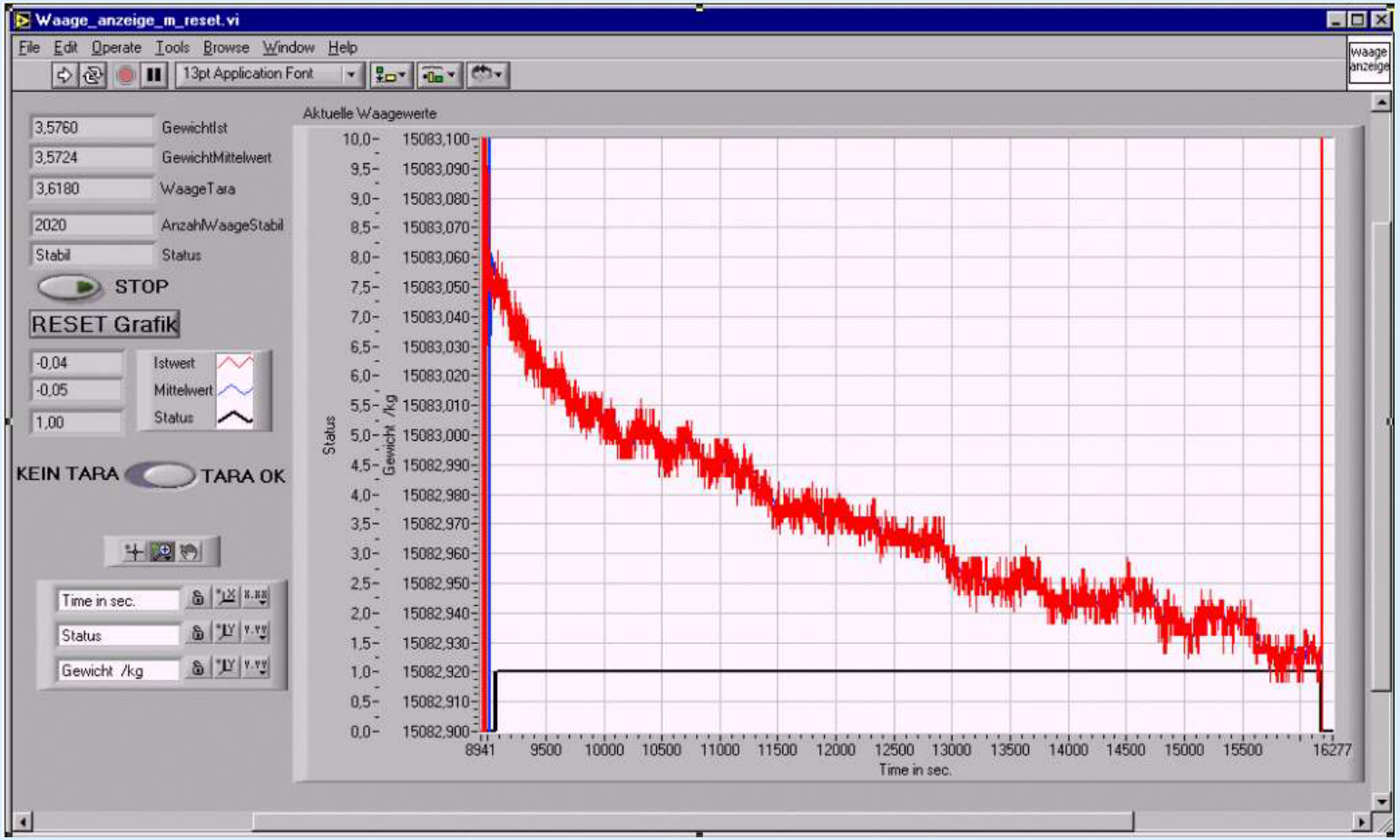


Mehrere Wiederholungsmessungen in Folge:

Gewicht in kg	Anzahl der WDH Messungen	Standardab-weichung der Einzelmessung (k=2) in kg	Maximal zulässige Standardab-weichung in kg
10057,820	13	0,236	0,160
15643,165	12	0,209	0,210
19555,253	8	0,214	0,260

Messunsicherheit der Waage

b) Drift der Waage, 2 Stunden Messzeit, Belastung = 15.000 kg

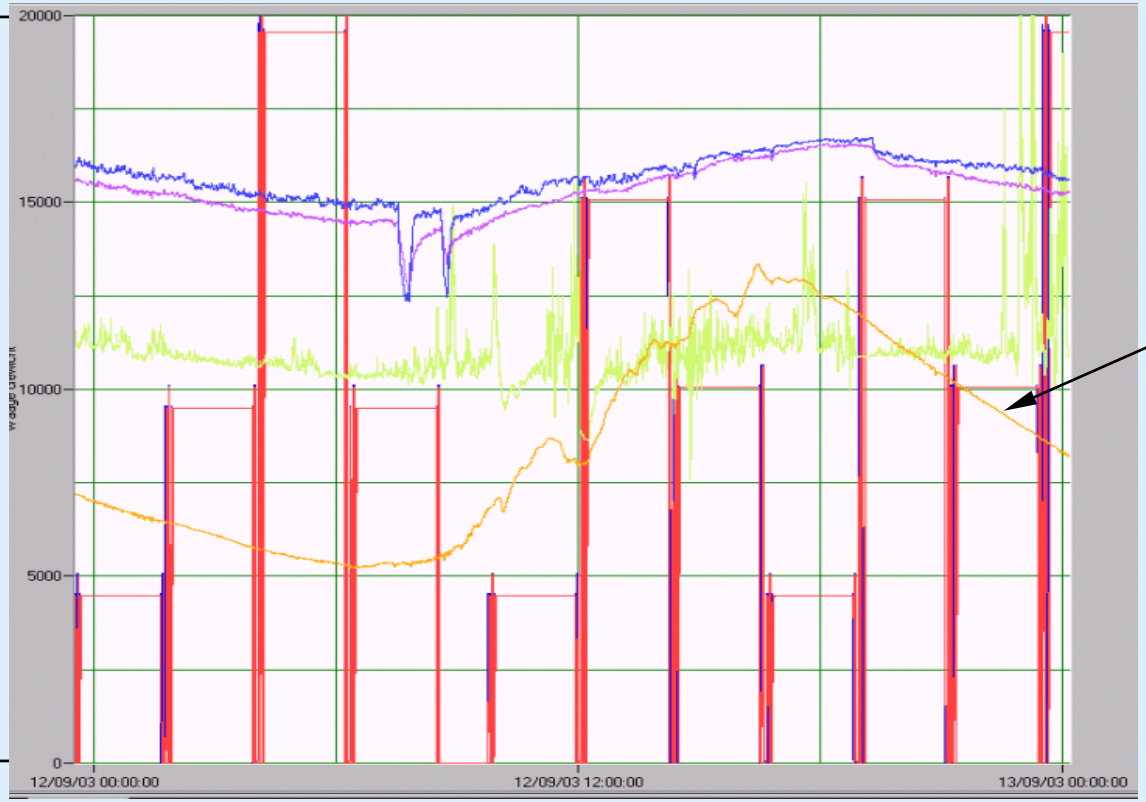


$\Delta G = 200g$

Messunsicherheit der Waage

b) Langzeitstabilität

$\Delta\vartheta$ = 21..27°C



Raumtemperatur

$\Delta\vartheta_{Raum}$ = +1 K --> $\Delta G \approx$ + 0,130 kg

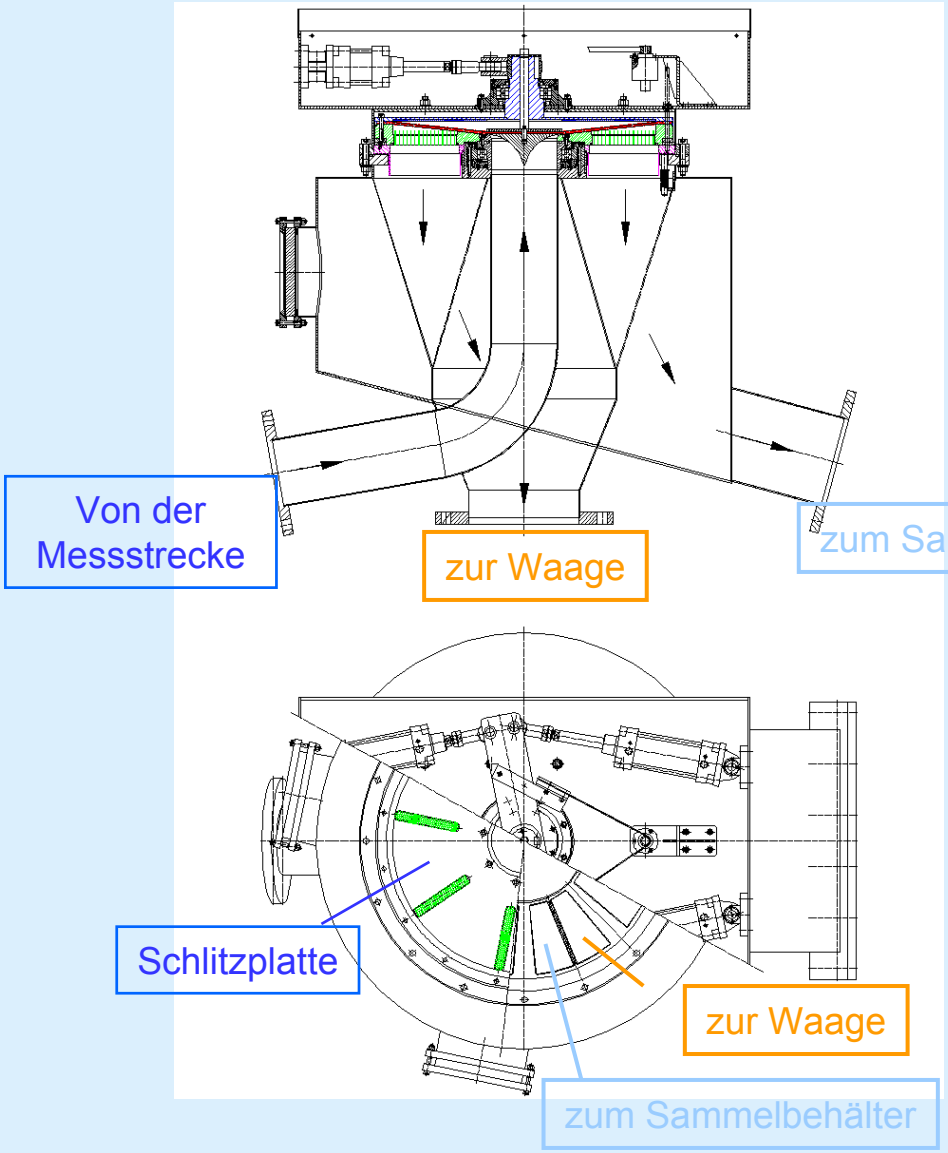
Konstanz der Raumtemperatur von $\Delta\vartheta_{Raum}$ < 0,3 K / 2h

$$\rho_L = 0{,}348459\,\frac{p_L}{T}\cdot\left(1-\frac{0{,}37802\cdot MH}{0{,}621978+MH}\right)$$

Inhalt

- Versuchsanlage
- Messunsicherheitsbudget
- Wägesystem
- Diverter
- Dichte des Wassers
- Zusammenfassung und Ausblick

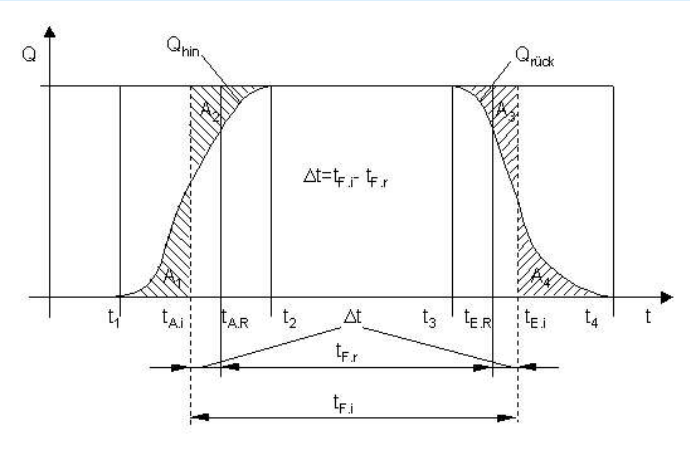
Diverter



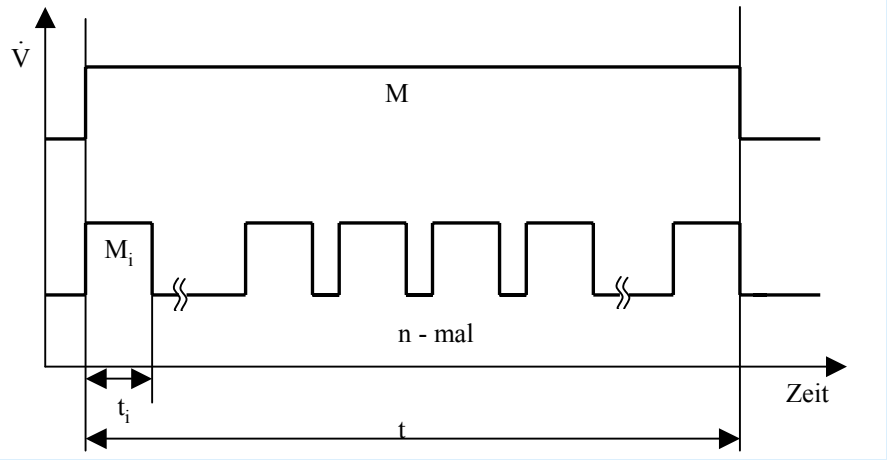
- geschlossene Bauweise, dadurch keine Verdunstungsverluste
- Umschaltzeit ≈ 1s
- Unsicherheit einer Umschaltung < 10 ms
- konstante Füllung
- kontanter Innendruck

Diverter

Ermittlung der systematischen Messabweichung der Umschalteinrichtung (Zeitfehler) nach DIN 24185 (Verfahren 1)



Einfacher Füllvorgang



Ermittlung des Zeitfehlers durch den „Vergleich“ von:

- eine Messung : Kontinuierliches Füllen
- eine Messung : Intervall Füllen

- Untersuchung $\Delta t = f(n)$, $u_{\Delta t} = f(n)$
- Untersuchung $\Delta t = f(V)$,
- Verifizieren der Auswertung
- Rückschlüsse auf andere Prüfpunkte

Diverter

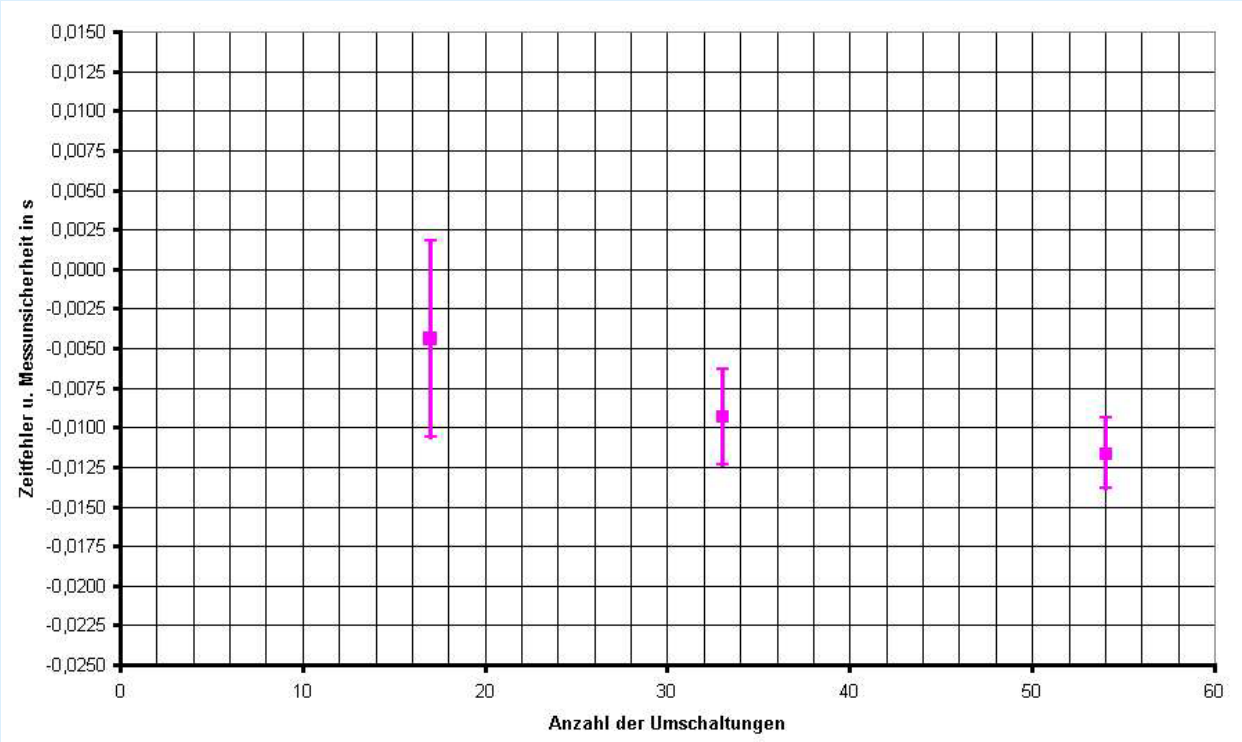
Exemplarischer Prüfpunkt :

Temperatur = 40 °C, Volumenstrom = 199 m³/h, Füllmenge 14 t, je 10 Wiederholungsmessungen

Dauer einer Umschaltung: 15,0 s (17 Umschaltungen)

7,0 s (33 Umschaltungen)

4,0 s (54 Umschaltungen)

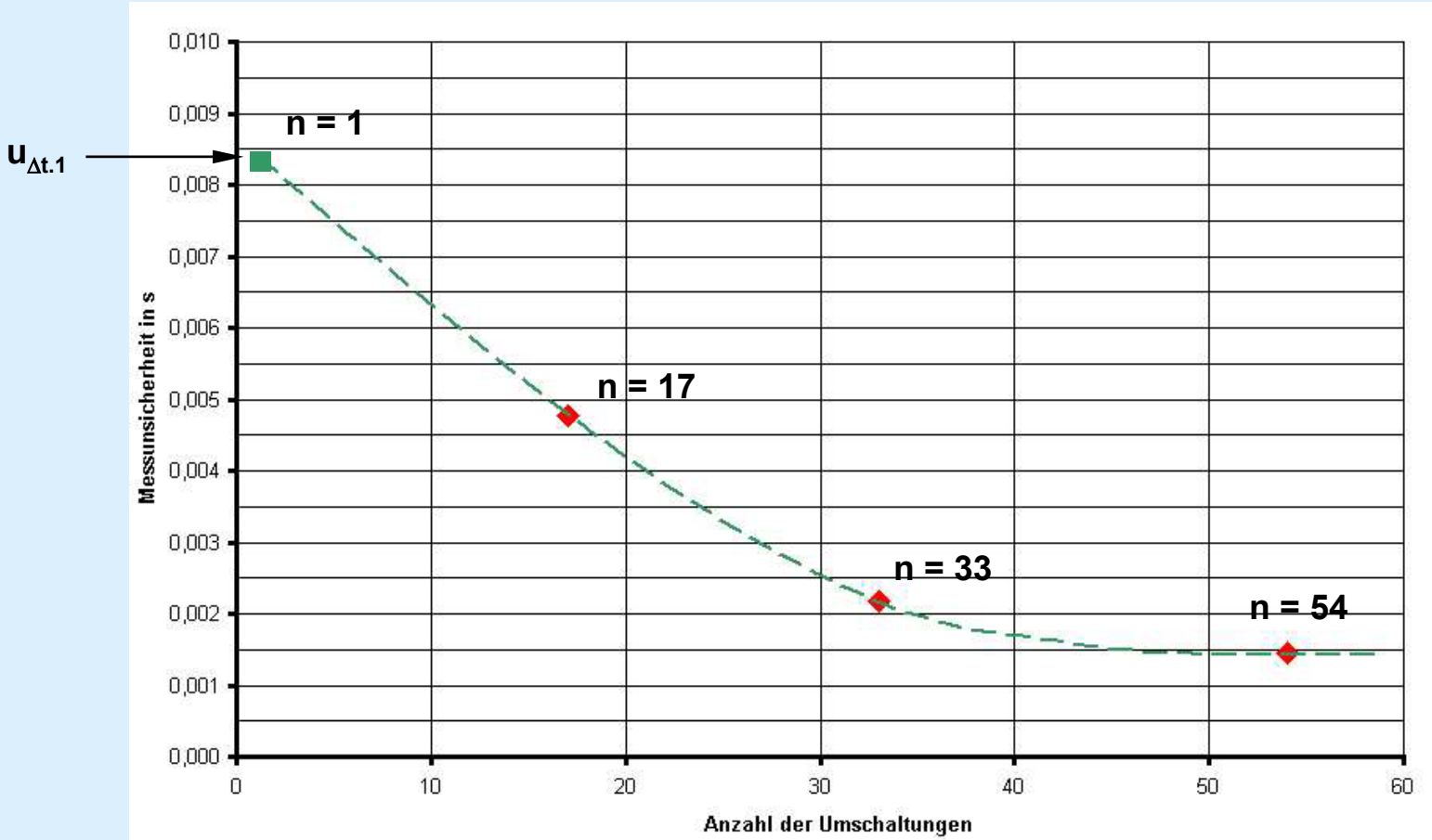


Je 10 mal:

Kontinuierliches Füllen, Intervall Füllen

Diverter

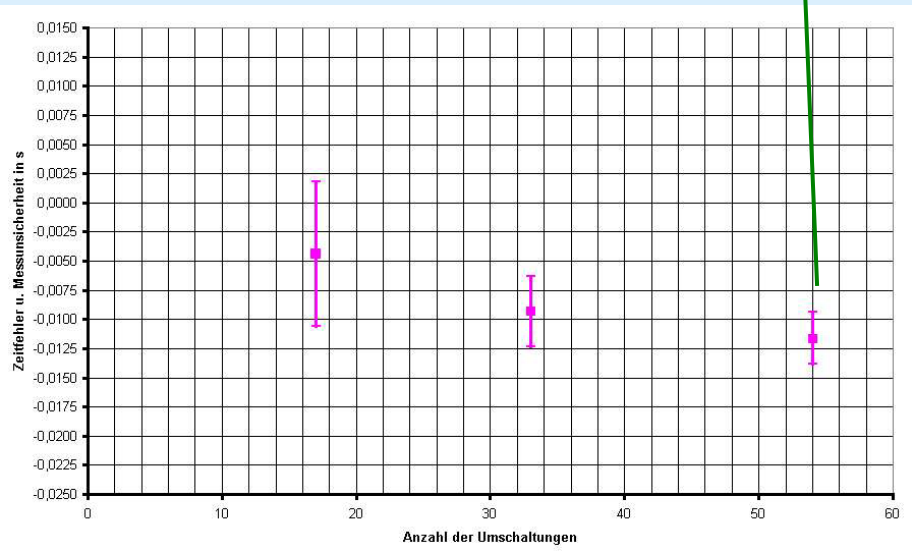
Messunsicherheit des Zeitfehlers in s bei verschiedener Anzahl der Umschaltungen (k=2)



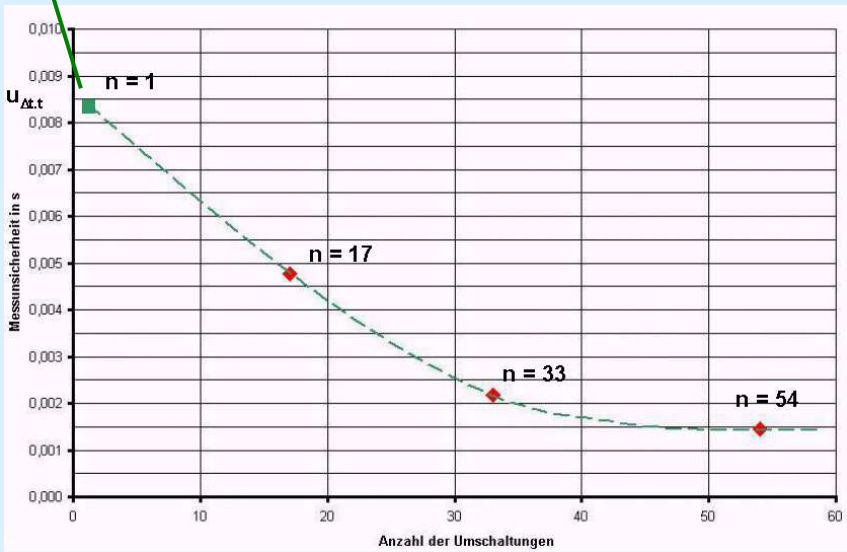
Diverter

Für den Zeitfehler gilt:

$$\overline{\Delta t} = \overline{\Delta t}_{n.\max} \pm u_{\Delta t.1}$$



Systematische Messabweichung



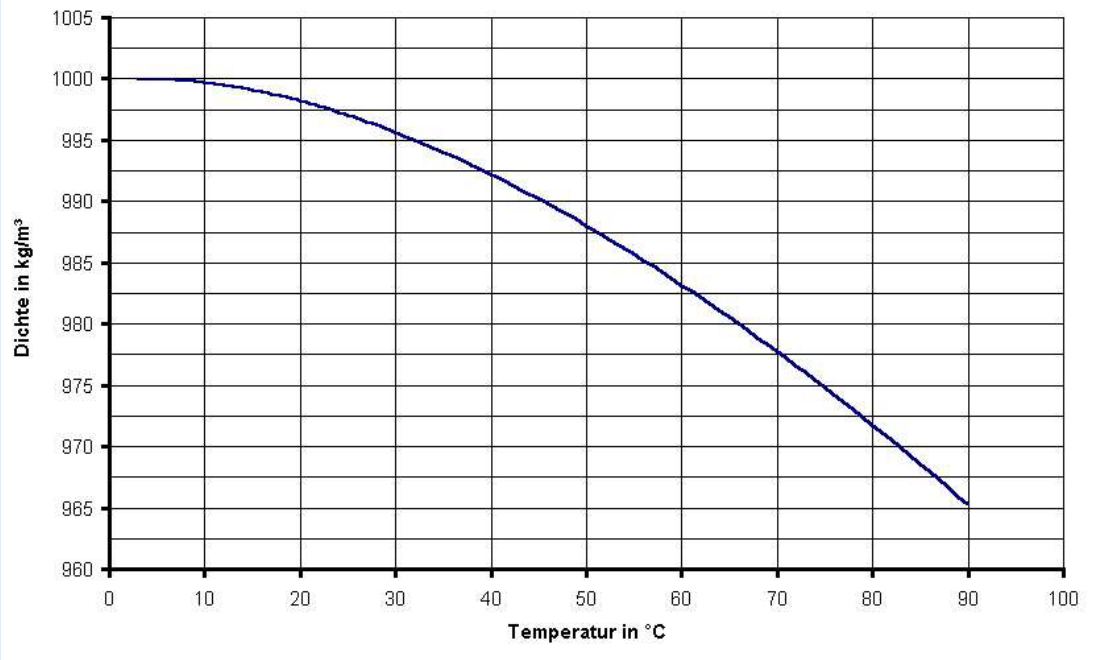
Unsicherheit

Inhalt

- Versuchsanlage
- Messunsicherheitsbudget
- Wägesystem
- Diverter
- Dichte des Wassers
- Zusammenfassung und Ausblick

Dichte des Wassers

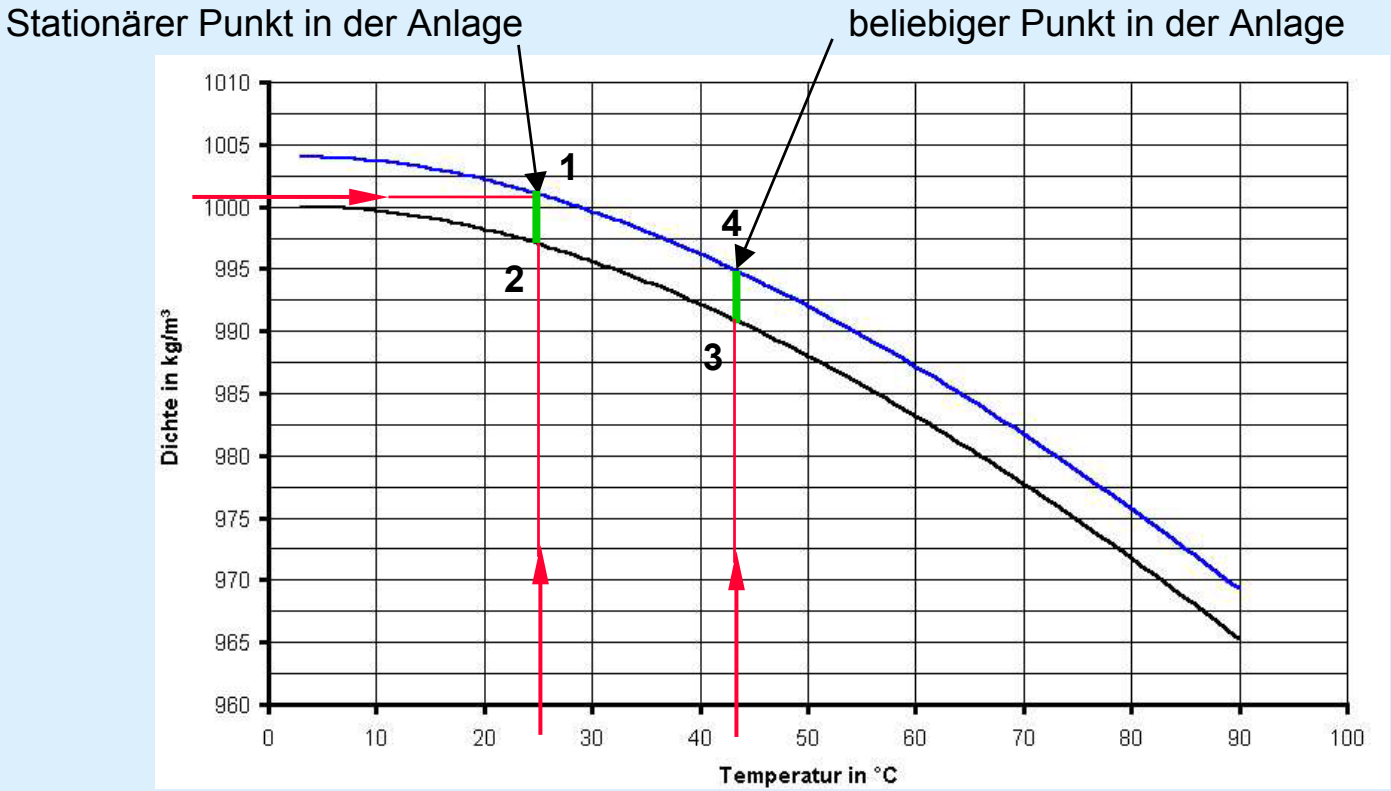
Dichte des Wassers = f (ϑ, p, κ)



Abhängigkeit der Dichte von der Temperatur nach [Bettin]

→ - kein bidestilliertes Anlagenwasser
- abweichende Leitfähigkeit
- abweichende Druckverhältnisse

Dichte des Wassers



- Messung der Dichte und Temperatur an einem stationären Punkt in der Anlage
- Ermittlung des Offsets ($\Delta\rho$) zur Kurve nach [Bettin]
- Messen der Temperatur an der gewünscheten Stelle in der Anlage
- Addition des Offsets zur nach [Bettin] berechneten Dichte
  Annahme: Offset ist bei kleinen Temperaturdifferenzen konstant

Inhalt

- Versuchsanlage
- Messunsicherheitsbudget
- Wägesystem
- Diverter
- Dichte des Wassers
- Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung und Ausblick

- **Messunsicherheitsbudget nutzen zur Analyse einzelner Einflussgrößen**

- Bestimmen der Messunsicherheiten der Eingangsgrößen

→ Wertigkeit der einzelnen Größen
- Wägesystem
- Diverter
- Dichte

- Temperatur- Stabilisiertes Wägesystem mit weitergehenden Untersuchungen zur Waage

- Untersuchungen zum Diverter an weiteren Messpunkten

- Genaueres Dichtemessgerät