Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin
Nationales Metrologieinstitut

Simulation Kavi-Düsen

Gudrun Wendt — Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Fachbereich „Flüssigkeiten“

Sven Brinkhorst — Universität Duisburg-Essen, Lehrstuhl für Strömungsmechanik

Erfahrungsaustausch „Aktuelle Untersuchungen in der Strömungsmesstechnik“
Braunschweig, 17. Februar 2015

Vortragsinhalt

- **Ausgangspunkt**

  Neidvolle Blicke der Wasserzählerbranche auf die komfortablen Möglichkeiten der Gaszählerprüfung mittels kritischer Düsen

  Zunehmende Notwendigkeit der Prüfung von Wasserzählern unter praxisnäheren Prüfbedingungen

- **Fragestellung**

  Gibt es „etwas Ähnliches“ auch für Flüssigkeitsströmungen?
  Ggf. auch für die dringend benötigten praxisnäheren Bedingungen?

- **Lösungsansatz**

  Untersuchungen an so genannten Kavitations-Düsen

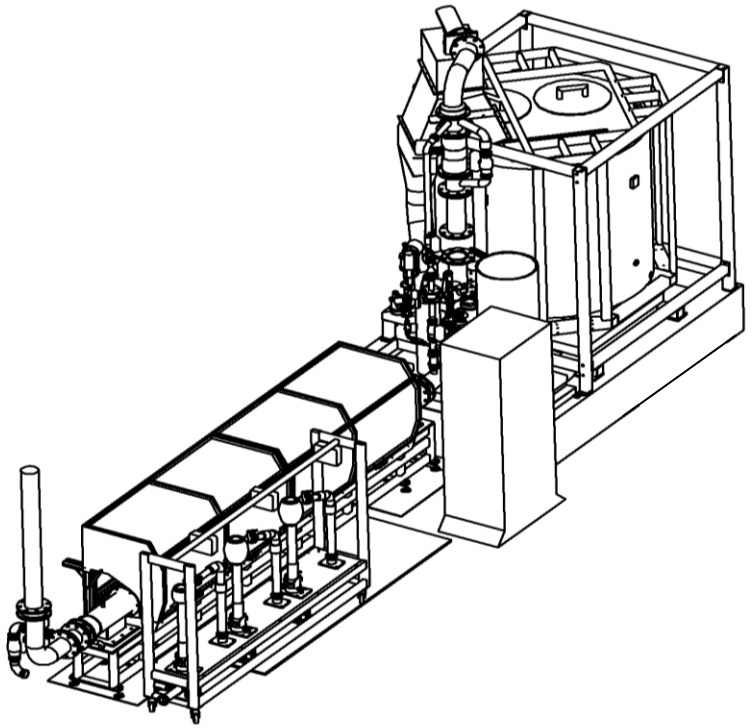
  a) generell auf Tauglichkeit
  b) speziell hinsichtlich der Realisierung schnell wechselnder Durchflüsse

- **Optimierungspotenzial**

  CFD-Simulationen – Schwerpunkt Düsengeometrieoptimierung

- **Nächste Schritte**

Ausgangspunkt: Neidvolle Blicke auf die kritischen Düsen



Wägesystem(e)/Behälter
Referenzzähler
Durchflussregulierung

Unmittelbare Rückführbarkeit zur PTB

Weltweit normungstechnisch abgesichert

Beliebig einsetzbar (Erdgas, Dosierung, Mischung, …)

Beste Eignung als Transfernormal

Mehr als 1000 Wasserzähler-Prüfstände in D

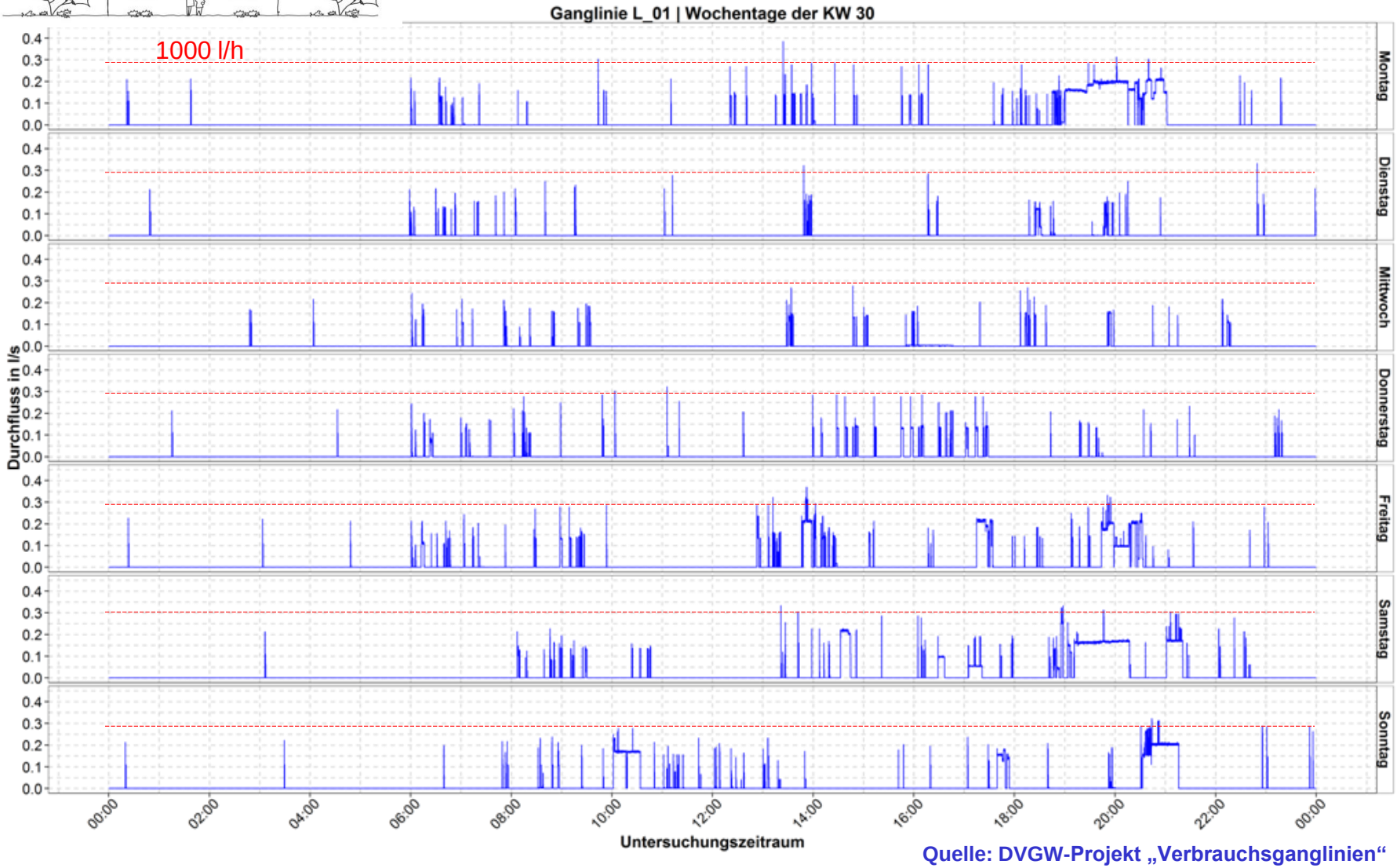
Keine unmittelbare Rückführbarkeit zur PTB

Bisher keine geeigneten Transfernormale

Probleme: Größerer Prüfbedarf;
Durchflussregulierung bei kleinen Durchflüssen

Ausgangspunkt: Forderung nach praxisnäheren Prüfbedingungen

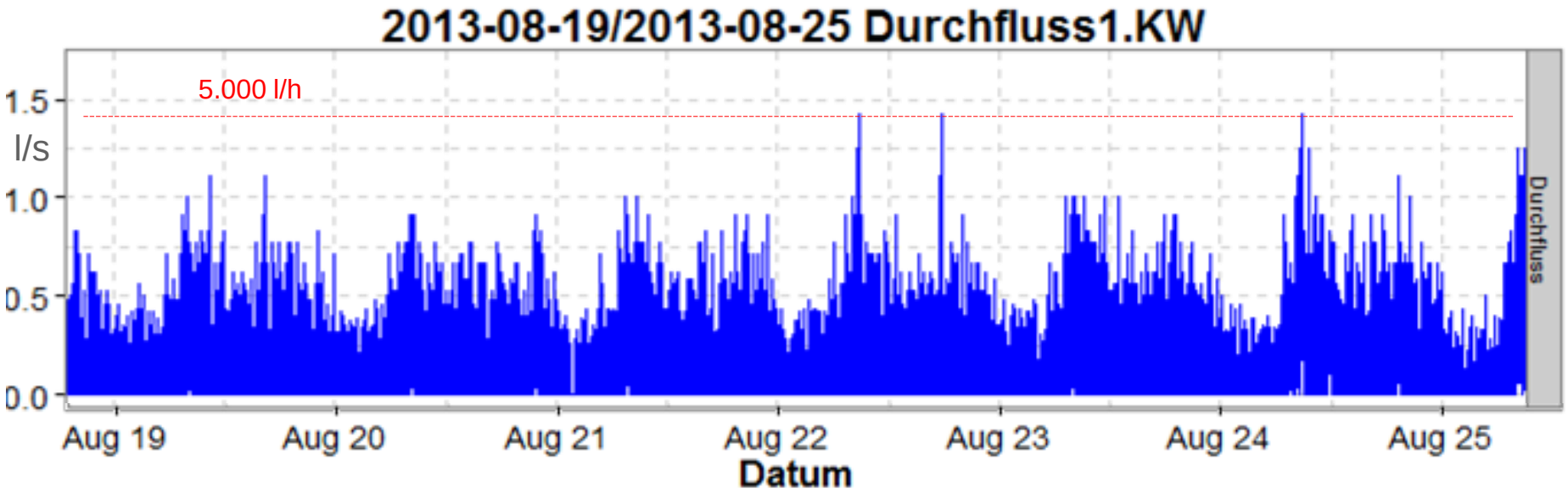
Beispielanalyse Einfamilienhaus - 1 Woche



Quelle: DVGW-Projekt „Verbrauchsganglinien“

Ausgangspunkt: Forderung nach praxisnäheren Prüfbedingungen

Beispielanalyse Entnahmeverhalten Wohnhaus mit 88 WE - 1 Woche



Quelle: DVGW-Projekt „Verbrauchsganglinien“

Ausgangspunkt: Forderung nach praxisnäheren Prüfbedingungen

Die Wasseruhr als Geldfress-Maschine

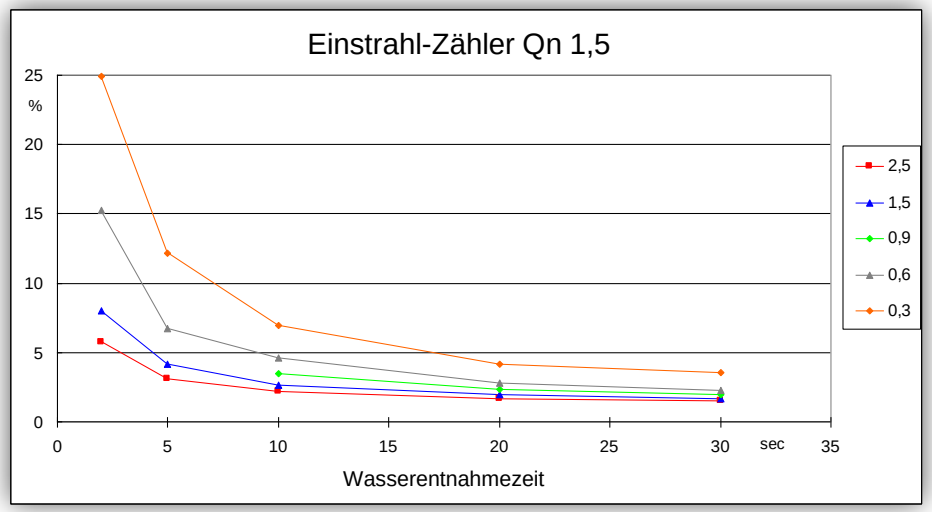
Abzocke bei Wasserzählern

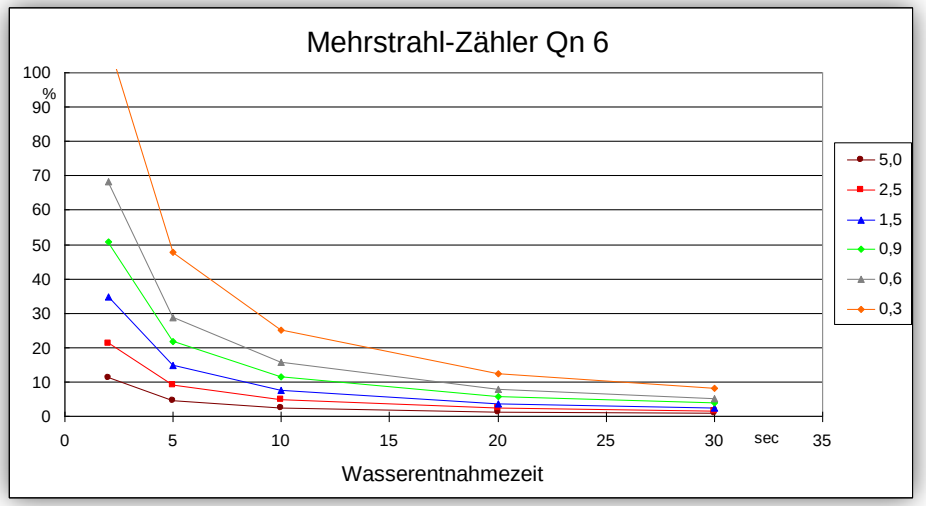
Ungenaue Messungen und überteuerte Modelle

→ **Nachlaufproblematik**

Wird in derzeitiger Prüf- und Zulassungspraxis nicht betrachtet bzw. berücksichtigt

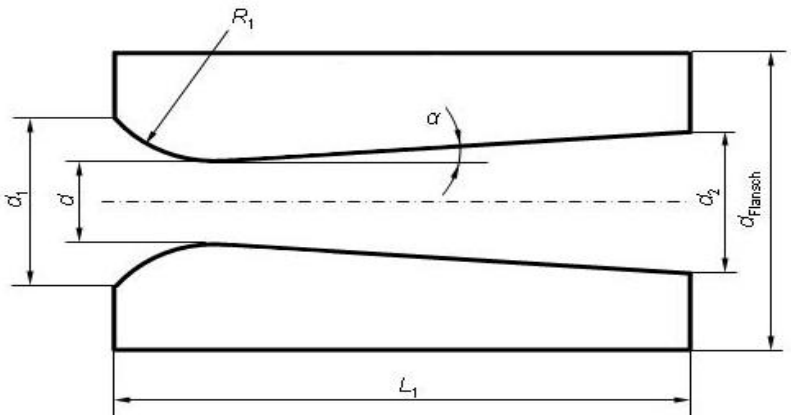
Bestätigung eines Handlungsbedarfs durch Untersuchungen in PTB





Fragestellung hinsichtlich Anwendung: Kritische Düse = Kavitationsdüse?

Venturi-Düse



Konstruktionsdaten (ISO 9300):

α:	3 °	(2…6°)
d_1:	2,5 d	
R_1:	2 d	(1,8…2,2 d)
L_1:	7 d	(1…7 d)

Bernoulli-Gleichung

$$\frac{v_1^2}{2} + g \cdot h_1 + p_1 = \frac{v_2^2}{2} + g \cdot h_2 + p_2 = \text{const};$$

$$\frac{v_1^2}{2} + p_1 = \frac{v_2^2}{2} + p_2$$

Gas

- Strömungsgeschwindigkeit ≤ Schallgeschwindigkeit
- Keine Fortpflanzung von Druckstörungen gegen die Strömung
- Durchfluss = const.
- Diffusor: „Auflösung“ durch Verdichtungsstöße

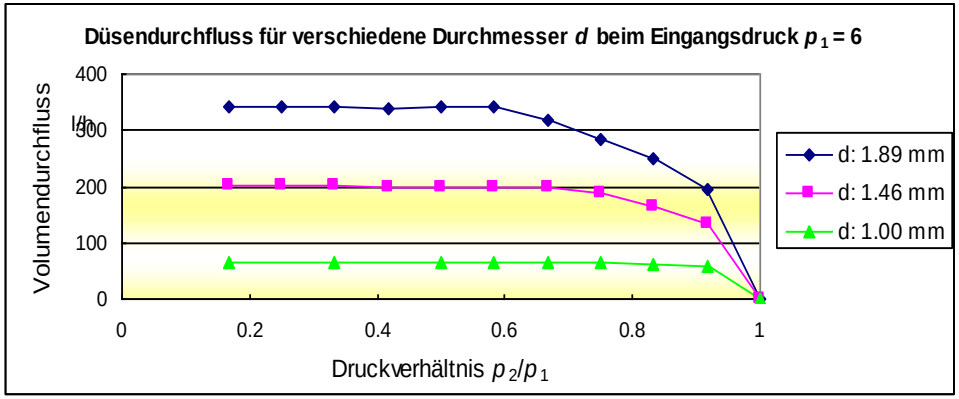
Flüssigkeit

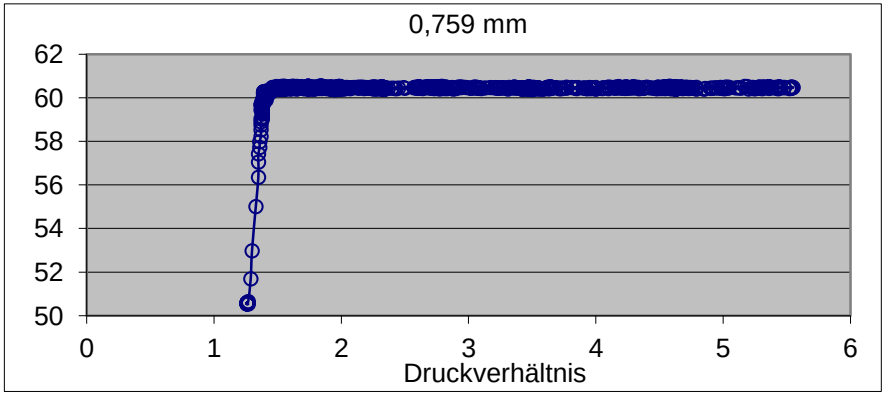
- Lokaler Druck ≤ Gleichgewichtsdampfdruck
- Bildung von Gasblasen
- Durchfluss = const.
- Diffusor: „Auflösung“ durch Zusammenfallen der Blasen (Kavitation)

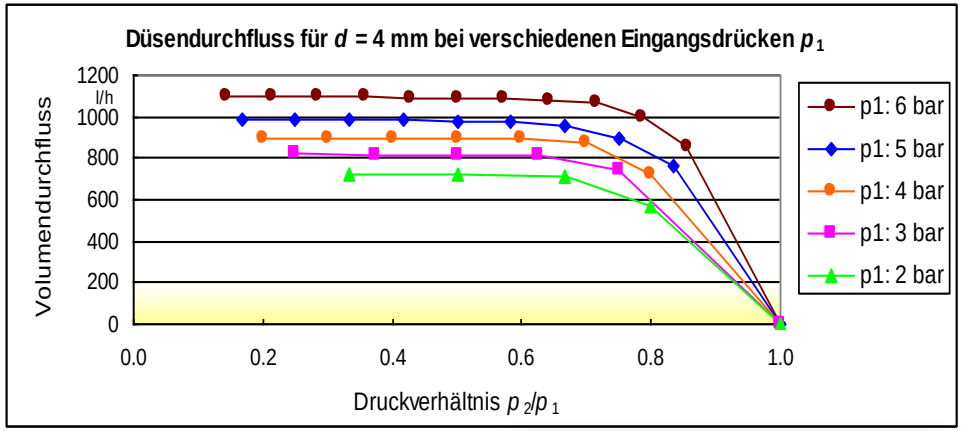
?

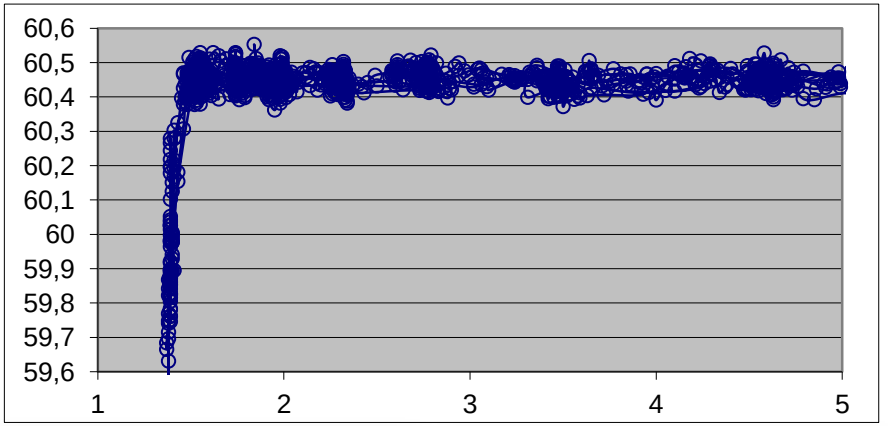
Untersuchungen der Kavi-Düsen hinsichtlich ihrer Tauglichkeit

Kavitation begrenzt den Durchfluss

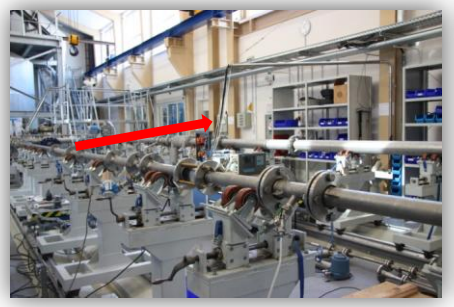


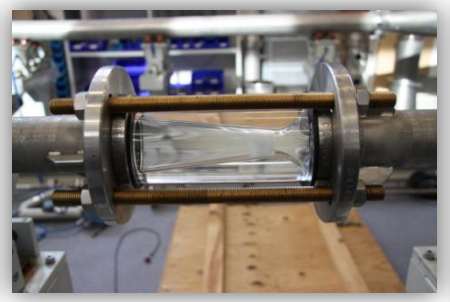




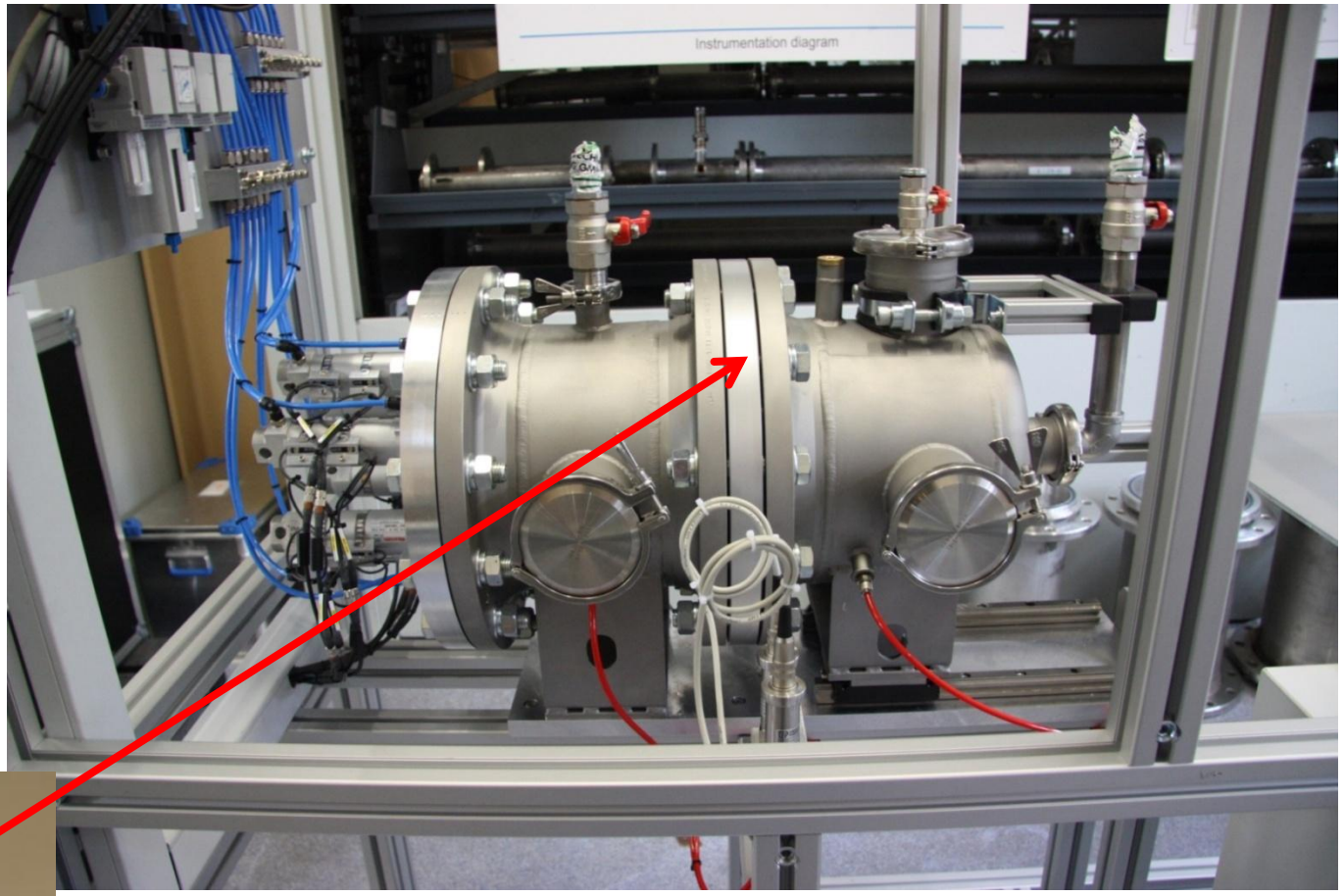


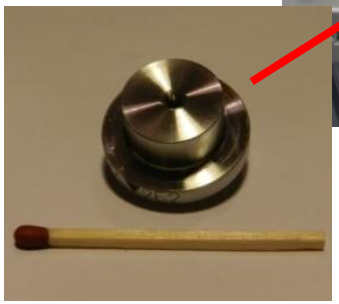
Messungen auf HDP zur „Veranschaulichung“





Prüfstand zur reproduzierbaren Realisierung wechselnder Durchflüsse mittels paralleler Kavitationsdüsen

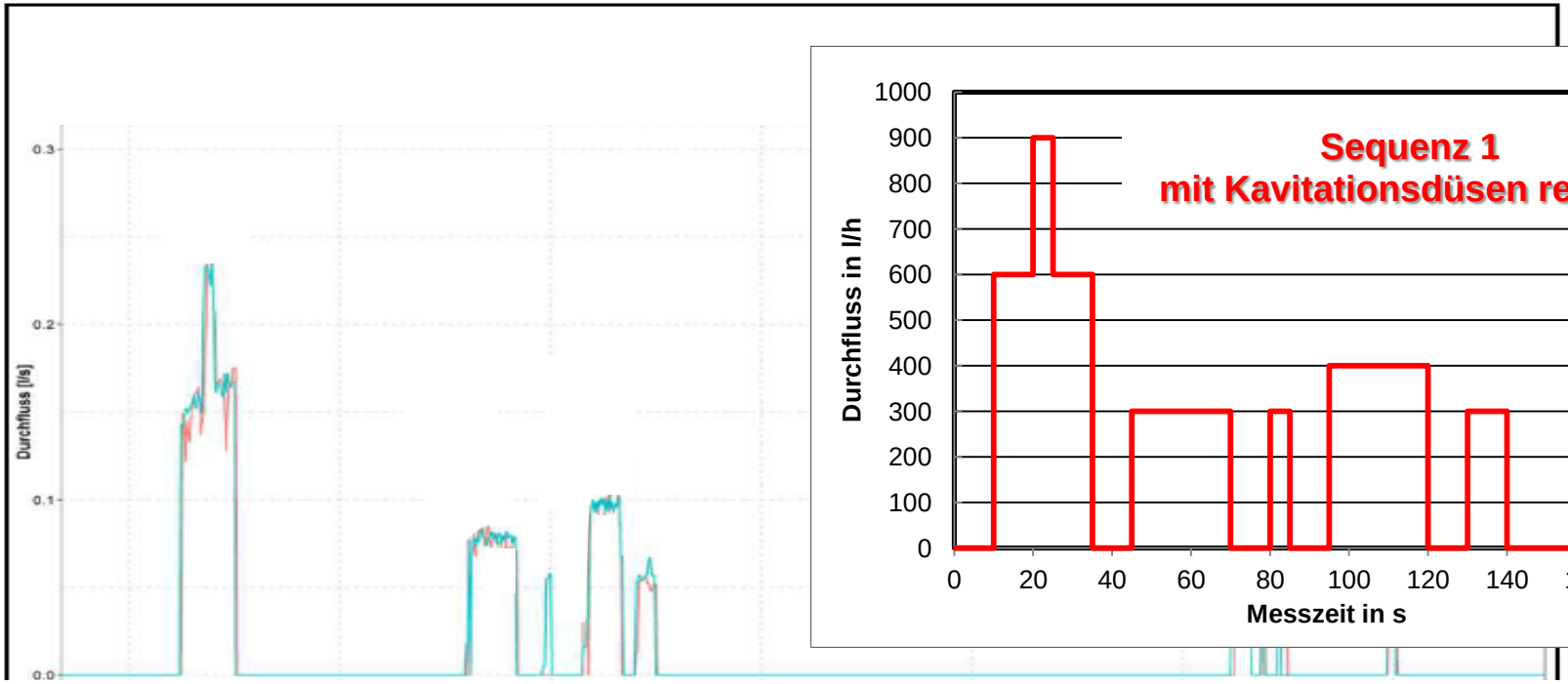


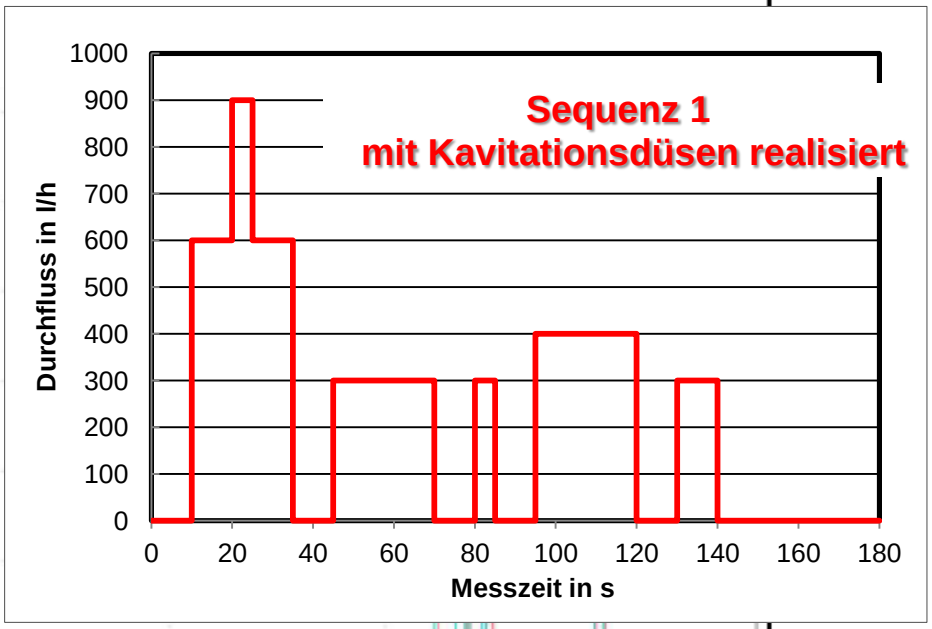


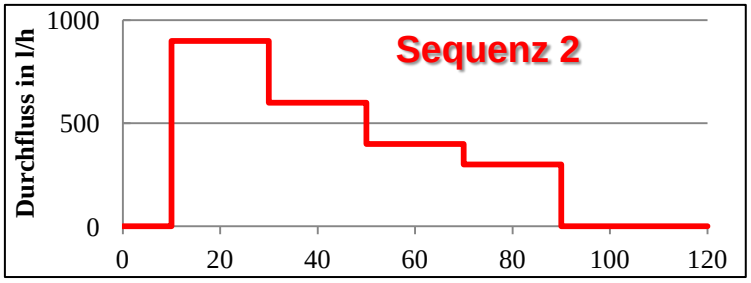
6 Düsen: 100 l/h, 300 l/h, 600 l/h, 1200 l/h, 2400 l/h, 5400 l/h

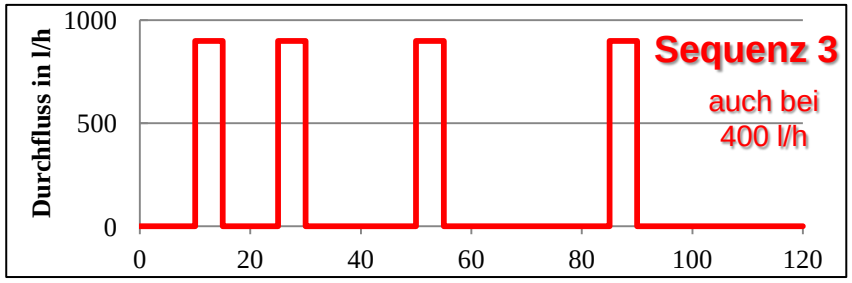
Durchflussbereich: 100 l/h bis 10 m³/h

Reproduzierbare Darstellung realer Durchflussänderungen im Labor

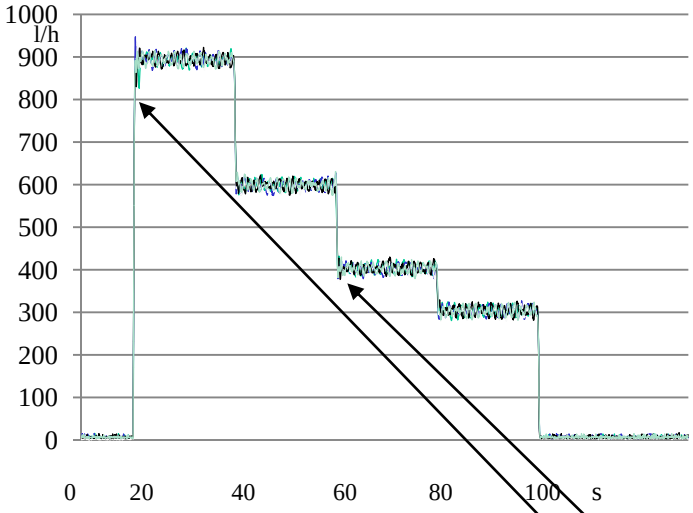






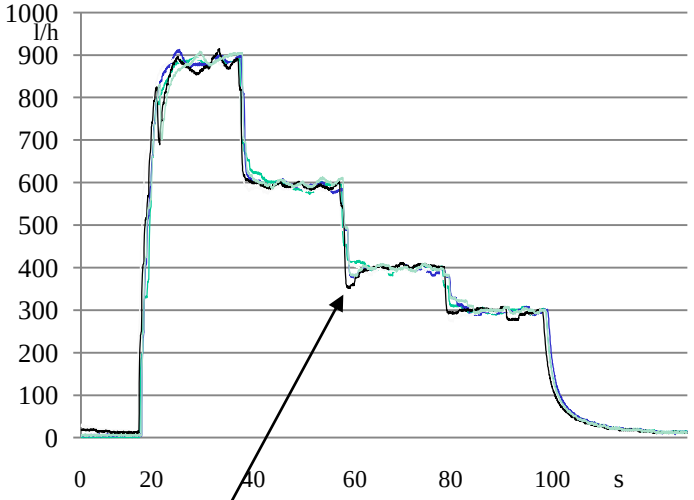


Nachweis der Reproduzierbarkeit



MID, Seq. 2

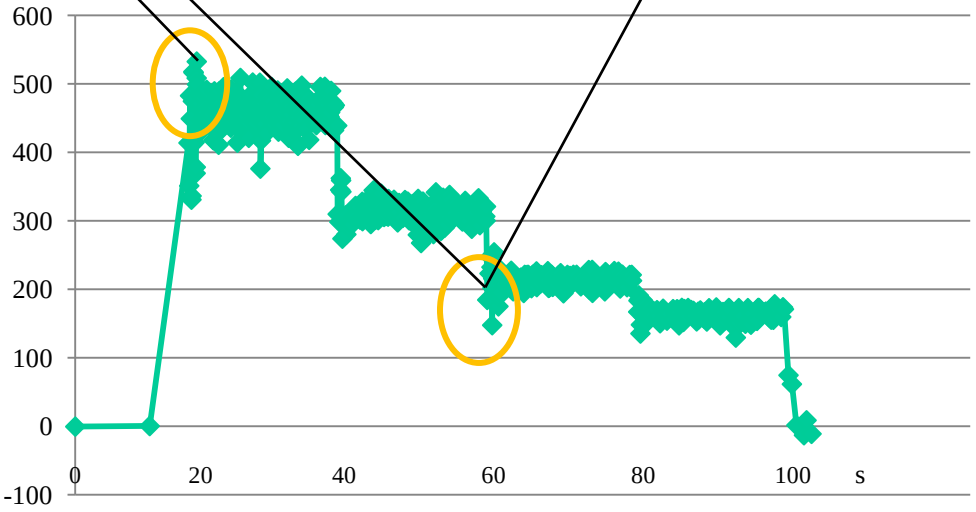
MID_2_01
MID_2_02
MID_2_03
MID_2_04
MID_2_05



US, Seq. 2

US_2_01
US_2_02
US_2_03
US_2_04
US_2_05

LDA - Einpunktmessung



Ergebnis der Experimente:

- generelle Tauglichkeit nachgewiesen
- schnelle wechselnde Durchflüsse reproduzierbar realisierbar

Aufgabe für unsere „Simulanten“:

- Modellbeschreibung
- Grenzen?
- Optimierungspotenzial (z.B. Innenkontur)?

Universität Duisburg-Essen
Lehrstuhl für Strömungsmechanik

Prof. Ernst von Lavante

Sven Brinkhorst

Zielsetzung

- Numerische Untersuchung unterschiedlicher Düsengeometrien bezüglich ihres Kavitationsverhaltens bei verschiedenen Druckverhältnissen p_{aus}/P_{ein}
- Zeitliche Analyse des Massenstroms in Abhängigkeit vom Druckverhältnis p_{aus}/P_{ein}
- Einfluss unterschiedlicher Kavitationsparameter auf den Massenstrom
- Aussagen über globale Betriebsgrenzen

Kavitationsmodell in StarCCM+

- Lösung der vollen RANS-Gleichungen für instationäre, turbulente, inkompressible, kavitierende 2-Phasen Strömung in 3D
- Interface capturing mittels VoF-Methode
- Kavitationsmodell mit Blasenwachstum nach Rayleigh („inertia controlled growth“)
- Turbulenz:
  - Realizable K-ε Turbulenz Modell
- Stoffwerte @ 20°C ; Keimdichte: 10^{12} /m^3 ; Keimradius: $5*10^{-6}$ m

Kavitationsmodell in StarCCM+

Zusätzliche Transportgleichung für den Volumenanteil $\alpha_v = \frac{V_v}{V}$

$$\frac{\partial \alpha_v}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \left(\alpha_v \vec{u} \right) = \Gamma_v$$

Quellterm (Phasenänderung infolge Kavitation)

$$\Gamma_v = \frac{4\pi R^2 n_0}{1 + \left(4/3 \pi R^3 \right) n_0} \frac{dR}{dt}$$

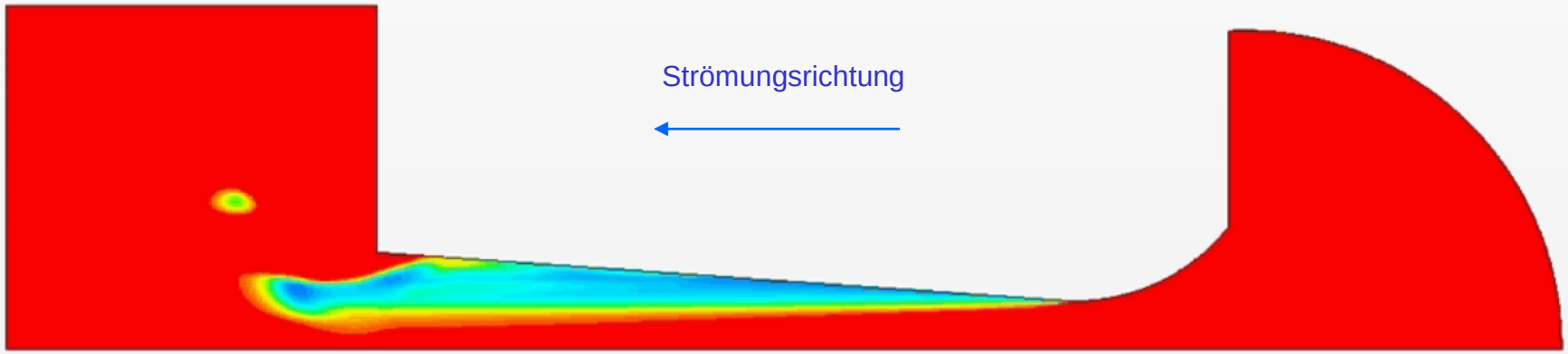
Blasenwachstum/-zerfall durch vereinfachte Rayleigh-Blesset-Gleichung

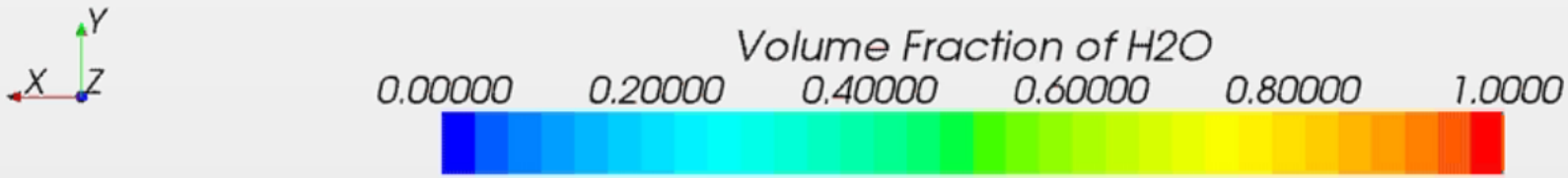
$$\left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{2}{3} \left(\frac{p_v - p}{p_l} \right)$$

Index *v*	Dampfphase
n_0	Dichte der Kavitationskeime mit dem Radius *R*
p_v	Sättigungsdampfdruck
p_l	Flüssigkeitsdruck

Simulation Kavitationsstart

„Durchschlagen“ des Kavitationsgebietes bei Einsetzen der Kavitation



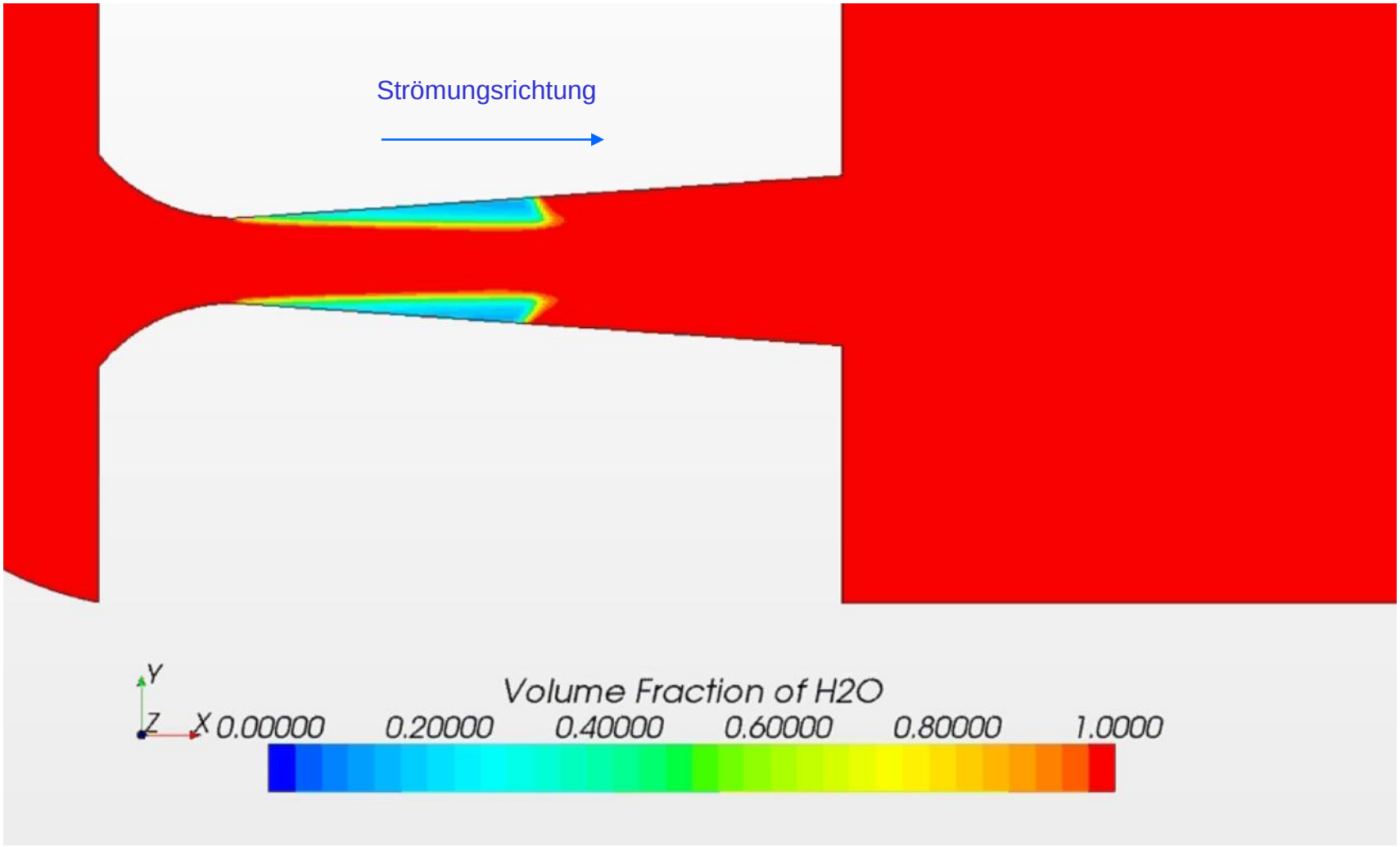


Messungen auf HDP mit Plexiglas-Düse

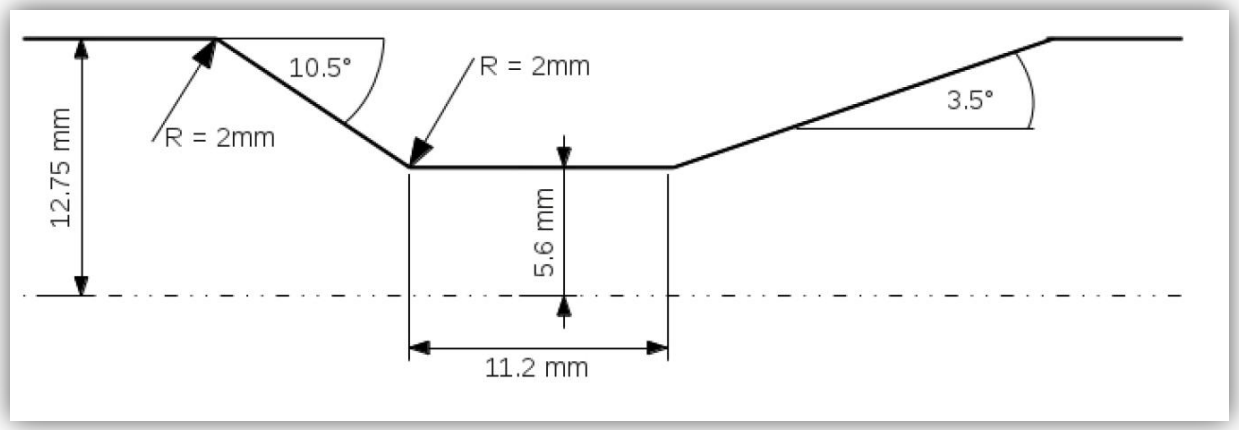
Strömungsrichtung

Zweiter Versuch:

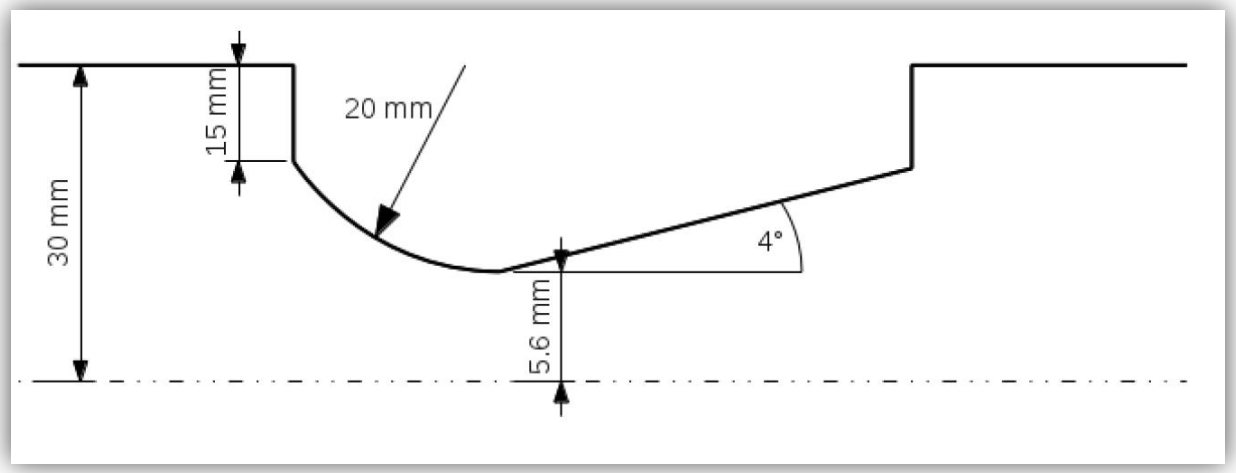
Ergebnis einer dreidimensionalen Simulation



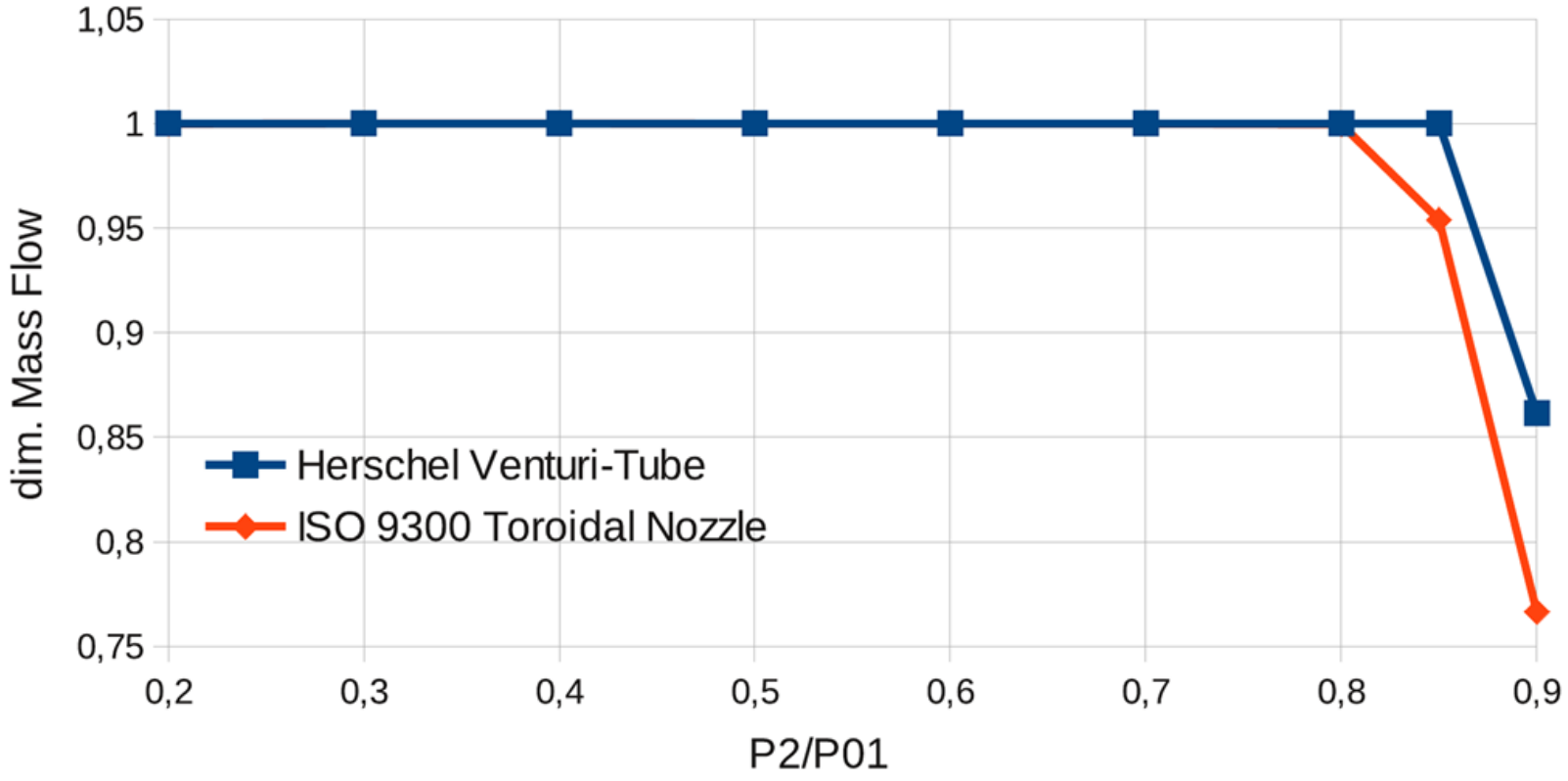
Numachi et al. (1962): Untersuchungen an so genanntem *Herschel Venturi-Rohr*



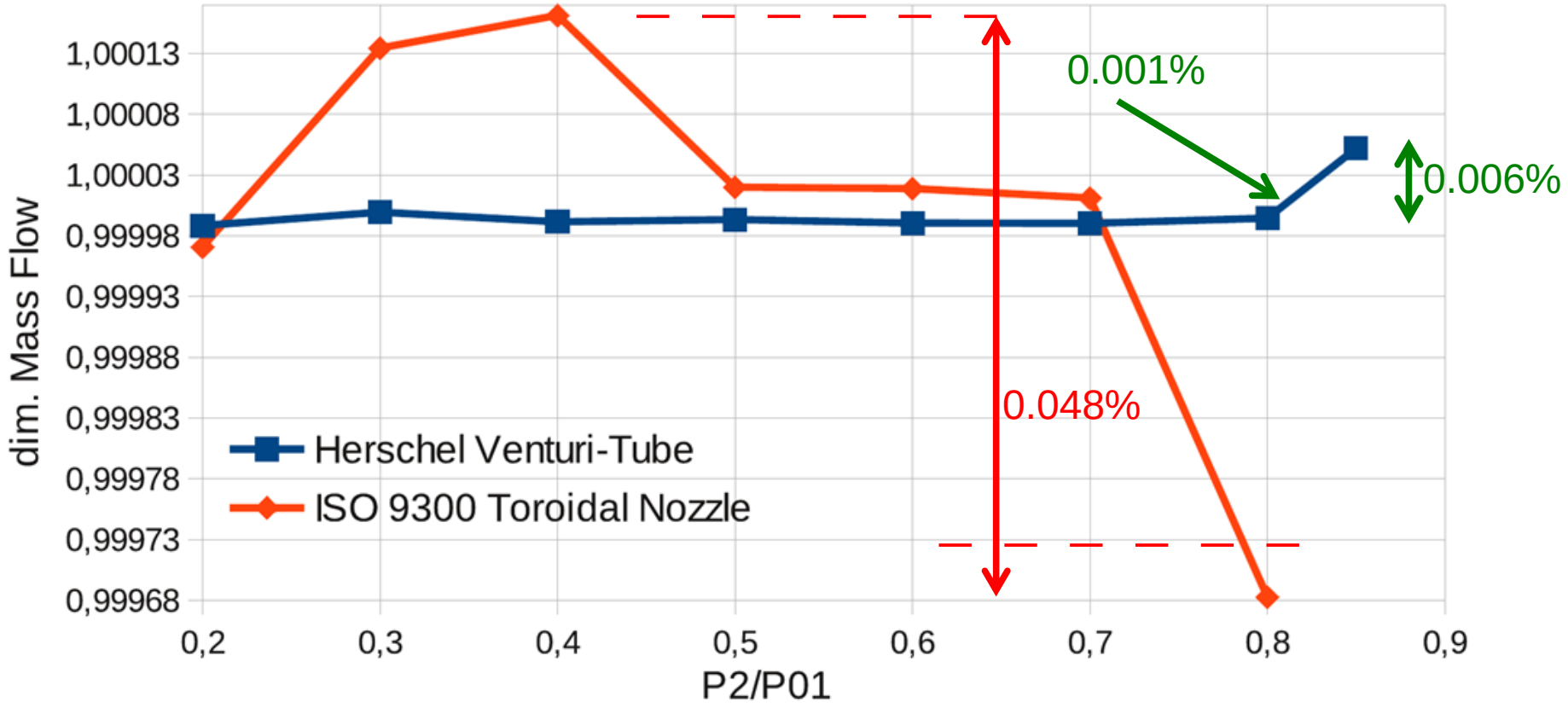
Vergleich mit Düse gemäß *ISO 9300 toroidal*



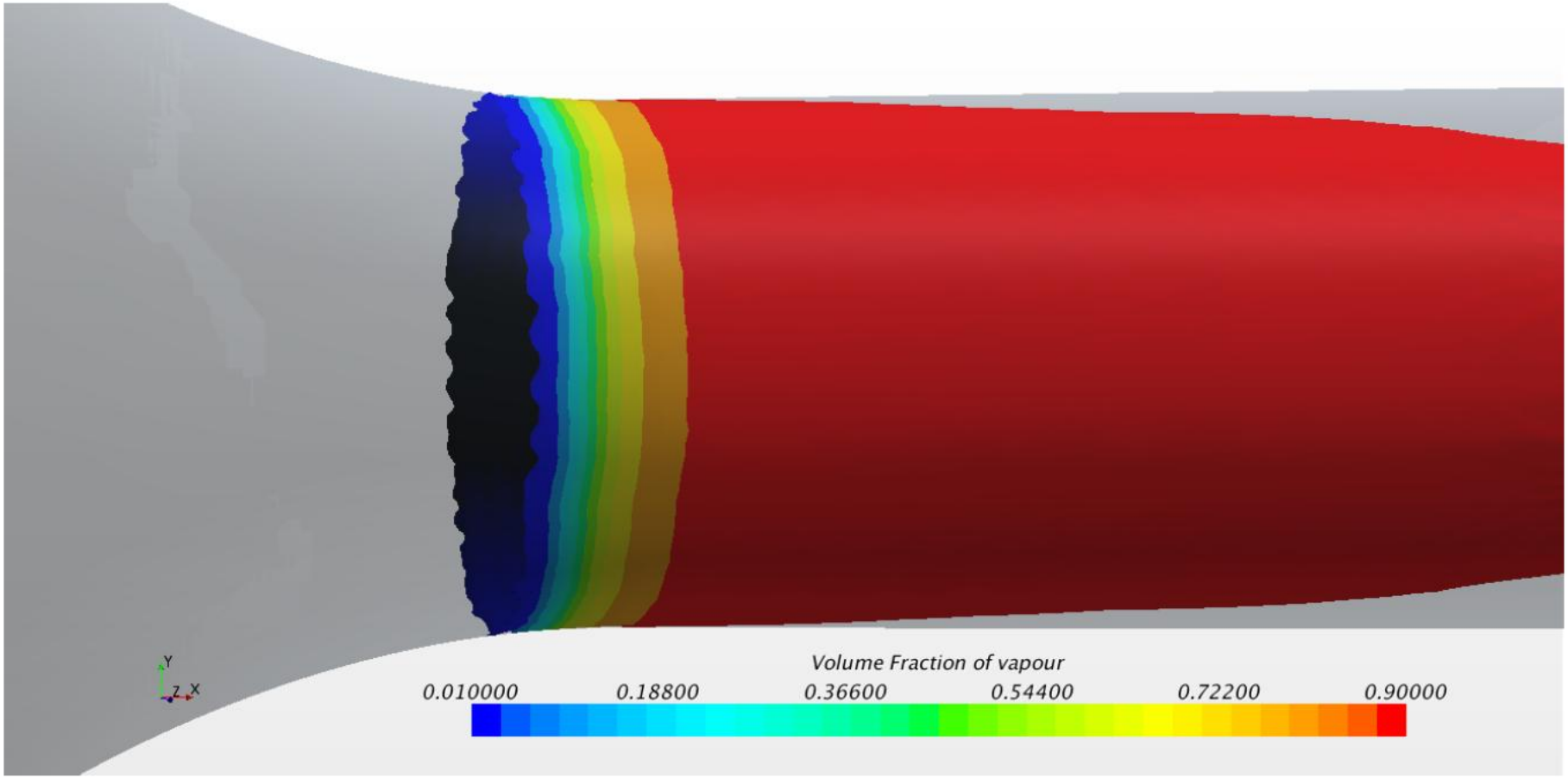
Massestrom Herschel Venturi-Rohr vs. ISO 9300 (Simulation in 3D)



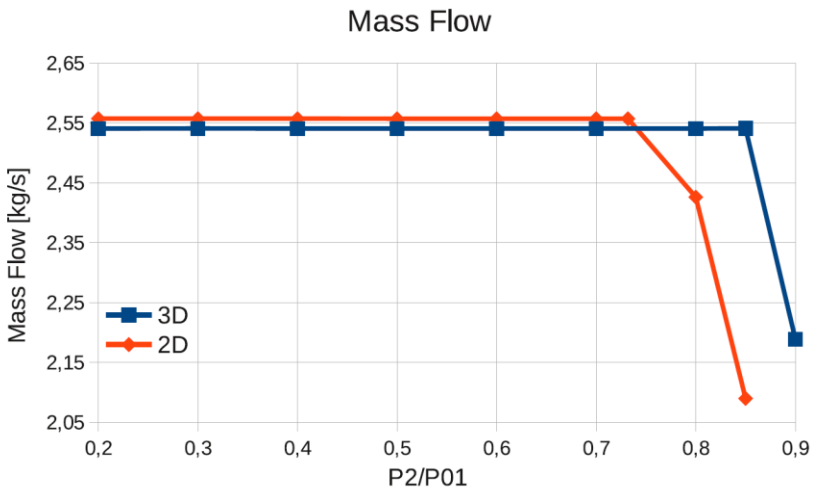
Massestrom Herschel Venturi-Rohr vs. ISO 9300 (Simulation in 3D)

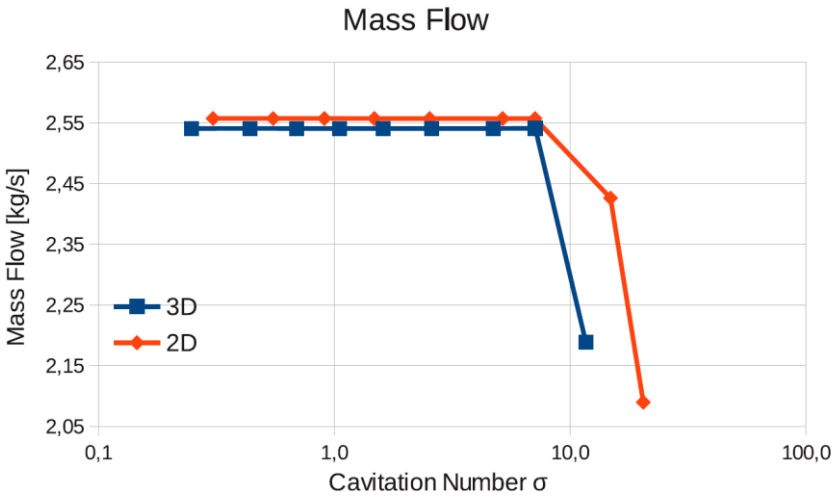


ISO 9300 Isooberflächen des Wasserdampf-Volumenanteils im Düsenhals für p_2/p_{01} = 0,4



Vergleich 2D und 3D-Simulation





- ***Herschel Venturi-Rohr anstelle ISO 9300***
- ***3D-Simulation***
- ***Weitere Ergebnisse:***
  - ***Minimale Kavitationslänge 2 x d***

Kavitationszahl σ

$$\sigma = \frac{p_{downstream} - p_v(T)}{p_{upstream} - p_{downstream}}$$

Handlungsbedarf bezüglich verbesserter Prüfverfahren für Wasserzähler

- einfache, robuste, rückführbare Referenzmesstechnik
- realitätsnähere Prüfprozeduren

Kavitationsdüsen bieten hoffnungsvolle Alternative

- Prototypen bereits realisiert
- experimentelle Bestätigung der Tauglichkeit
- Nachweis durch Simulationen
- Arbeiten an optimierten Düsenformen

Arbeiten werden fortgesetzt

- Spezielle Vergleiche Simulation - Experiment

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin
Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Dr.-Ing. Gudrun Wendt
Fachbereich „Flüssigkeiten“

Telefon: 0531 592-1500
E-Mail: gudrun.wendt@ptb.de
www.ptb.de