

**HZDR-028**

# **GAMMADENSITOMETRISCHE GASGEHALTS- MESSUNGEN AN EINEM BEHEIZTEN ROHRBÜNDEL**

R. Franz, U. Sprewitz, U. Hampel

Wissenschaftlich-Technische Berichte  
HZDR-028 · ISSN 2191-8708

**WISSENSCHAFTLICH-  
TECHNISCHE BERICHTE**

**hZDR**



**HELMHOLTZ  
ZENTRUM DRESDEN  
ROSSENDORF**

Wissenschaftlich-Technische Berichte  
**HZDR-028**

R. Franz, U. Spewitz, U. Hampel

**GAMMADENSITOMETRISCHE GASGEHALTS-  
MESSUNGEN AN EINEM BEHEIZTEN ROHRBÜNDEL**

**HZDR**

 **HELMHOLTZ**  
ZENTRUM DRESDEN  
ROSENDORF

Druckausgabe: ISSN 2191-8708

Elektronische Ausgabe: ISSN 2191-8716

Die elektronische Ausgabe erscheint unter Creative Commons License (CC BY-NC-ND):

Qucosa: <http://fzd.qucosa.de/startseite/>

2012

Herausgegeben vom

Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e.V.

Postfach 51 01 19

D-01314 Dresden

Bundesrepublik Deutschland/Germany

# Gammadensitometrische Gasgehaltsmessungen an einem beheizten Rohrbündel

---

*R. Franz, U. Sprewitz, U. Hampel FWDF*

## Zusammenfassung

Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projektes (Förderkennzeichen 02NUK010A) wurden an einem senkrechten, mit Flüssigkeit umströmten und beheizten Rohrbündel gammadensitometrische Gasgehaltsmessungen durchgeführt. Es wurden zwei Messpositionen, zwei Volumenstromraten des umströmenden Fluides, zwei Unterkühlungswerte und elf Wärmestromdichten zur Messung gewählt. Der Bericht umfasst die Beschreibung des Versuchsstandes, die Messmethodik, Ergebnisse und deren Interpretation. Im Detail wird ebenfalls die Messunsicherheit bewertet.

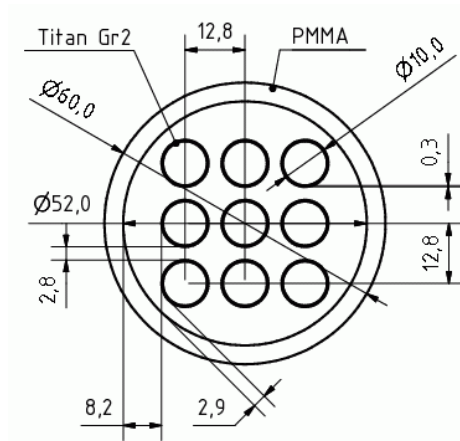
## Einführung

Umströmte Rohrbündel sind als Übertrager von Wärmeenergie in einem breiten Spektrum von Anwendungsgebieten zu finden. Das beginnt bei Heizkörpern und Kühlaggregaten und führt über industrielle Wärmetauscher bis hin zu Brennelementen in Kernkraftwerken. Für jede dieser Anwendungen besteht die Anforderung, die Energieübertragung an der Oberfläche der eingesetzten Rohre zu optimieren. Häufig wird hierbei auf eine Modellierung durch Computational Fluid Dynamics (CFD) zugegriffen. Für die Entwicklung der eingesetzten CFD-Codes ist eine Validierung durch geeignete Experimente unumgänglich.

Mit diesem Ziel wurde innerhalb eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projektes (Förderkennzeichen 02NUK010A) ein Versuchsstand errichtet, in dem ein beheiztes Rohrbündel von einem Fluid umströmt wird und der es ermöglicht, mit definierten und variierbaren Parametern Untersuchungen an lokal siedendem Fluid durchzuführen. Im vorliegenden Bericht werden gammadensitometrische Messungen an diesem Versuchsstand vorgestellt und Messergebnisse diskutiert.

## Versuchsstand

Der Versuchsstand kombiniert eine durchströmte Testsektion mit einer Rückkühleinrichtung samt Pumpstand für das Fluid. In der Testsektion befindet sich ein senkrechttes Bündel von neun Titanrohren in äquidistanter 3x3 – Anordnung. (Bild 1). An drei Höhenpositionen wird das



Rohrbündel von Abstandshaltern geführt, die konstruktiv auf eine minimale Strömungsbeeinflussung optimiert wurden. Das Bündel ist von einem Acrylrohr mit einem Außendurchmesser von 60,0 mm und einer Wandstärke von 4,0 mm umschlossen. Am unteren Ende der Rohranordnung ist eine zylindrische Einströmkammer mit radialem Zustrom des Fluides angebracht, am oberen Ende eine ebenso aufgebaute Ausströmkammer. Ein- und Ausströmanschlüsse haben einen vertikalen Mittenabstand von 1078 mm zueinander. Das Titanrohrbündel ist durch die Kammerböden druckdicht nach außen geführt.

Bild 1: Querschnitt Testsektion

Die Beheizung des Rohrbündels erfolgt direkt elektrisch in einem definierten Höhenabschnitt des Bündels. Dafür sind die Rohre jeweils mit von beiden Seiten eingeführten Kupferkernen als Stromzuführung ausgerüstet. Der lichte Abstand der beiden Kupferkerne jedes Rohres zueinander beträgt 300 mm und bestimmt Höhe und Position der Heizzone.

Die acht äußeren Heizstäbe sind elektrisch parallel und als Gruppe in Reihe zum mittleren Heizstab geschaltet. Das führt im Betrieb der Anlage zu einem Verhältnis der Wärmestromdichten von 1 zu 64 zwischen den äußeren Heizstäben und dem inneren.

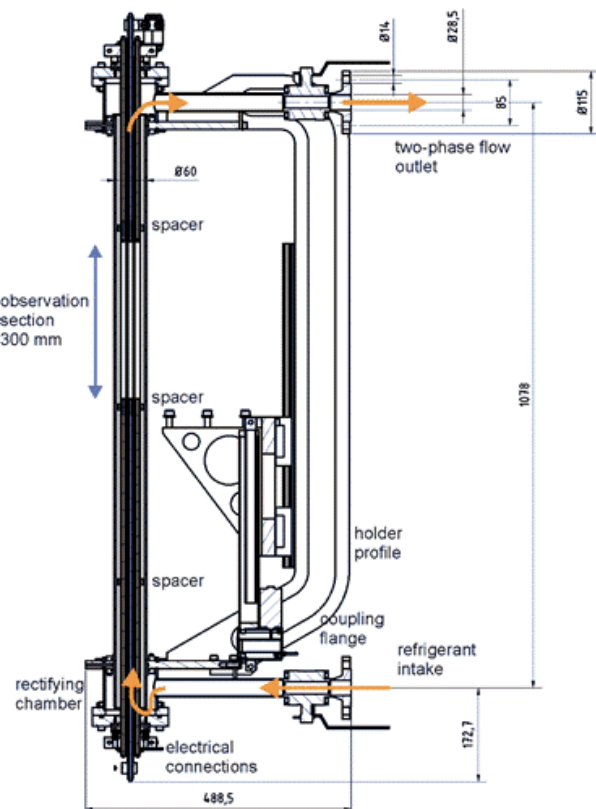


Bild 2: Skizze Testsektion

## Fluid

Als untersuchtes Fluid wurde Octafluorzyclobutan gewählt, das als Kältemittel die Bezeichnung RC318 trägt und hauptsächlich als Passivierungsgas beim reaktiven Ionentiefenätzen zur Anwendung kommt.

Maximaldruck (abs.)	4,9	bar
Maximaltemperatur	40	°C
Verdampfungsenthalpie bei Maximaltemperatur	98,6	J/g
Enthalpie bei Maximaltemperatur	244	J/g
Entropie bei Maximaltemperatur	1,15	J/gK
Dichte bei Maximaltemperatur	1450	kg/m <sup>3</sup>
Viskosität	3,40E-04	Pas
Oberflächenspannung	6,40E-03	N/m

Tabelle 1: Parameter RC318 an der Testsektion

In Tabelle 1 sind die wichtigsten der zur Auslegung des Versuchsstandes verwendeten Parameter aufgeführt.

Der Arbeitsbereich des Fluides innerhalb seiner Siedekennlinie ist aus Diagramm 1 zu entnehmen.

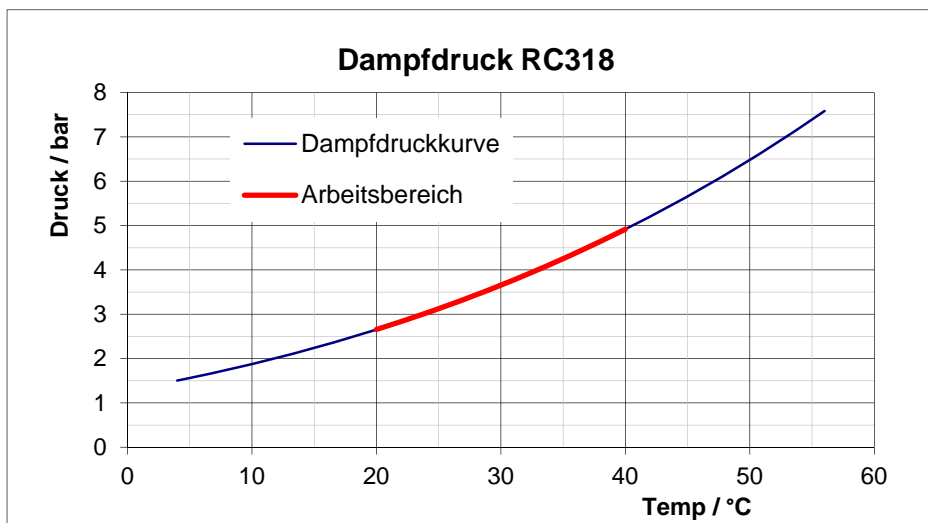


Diagramm 1: Fluid dampfdruck und Arbeitsbereich der Versuchsanlage

## Messaufbau Densitometrie

Zur gammadensitometrischen Messung kam eine Cäsiumquelle zum Einsatz. ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $E_\gamma=662\text{ keV}$ ,  $T_{0,5} = 30,17\text{ a}$ ) Durch eine Kollimatoranordnung wurde ein Stiftstrahl mit einer Breite von 2,0 mm und einer Höhe von 5,0 mm erzeugt.

Als Detektor wurde eine Sonde mit Natriumjodid-Kristall, Photomultiplier und Signalverstärker eingesetzt, dessen Sensitivität durch einen axial ausgerichteten Kollimator fokussiert wurde, der dem der Quelle identisch ist. (Bild 3)

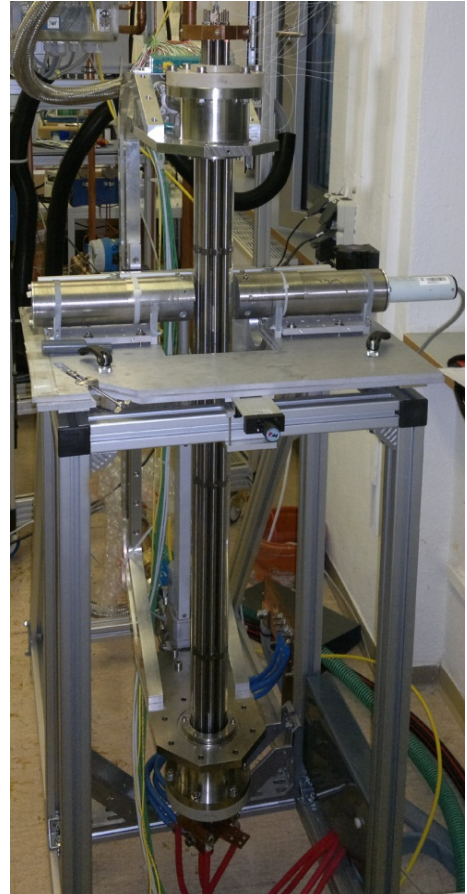


Bild 3: Testsektion und Kollimatoren für Quelle und Detektor

Zur Zählung und spektralen Zuordnung der detektierten Gamma-Quanten wurde ein Mehrkanal-Analysator vom Typ MCA-166 verwendet.

Die Quelle – Detektor – Anordnung wurde auf einem Verfahrtschiff fixiert, der in horizontaler Richtung sowohl ein eindimensionales Verfahren, als auch eine Winkeljustage ermöglicht. Eine Höhenpositionierung der Messtechnik zur Testsektion wurde über eine motorisch betriebene Schlittenkonstruktion realisiert, die die komplette Testsektion in vertikaler Richtung führt. Die Reproduzierbarkeit der Positionierung wurde durch digitale Wegaufnehmer (vertikal und horizontal) mit einer Ables- und Wiederholgenauigkeit von 0,01 mm sichergestellt.

Die Winkeljustage sowie die Einstellung der horizontalen Strahlposition „Bündelmitte“ erfolgte unter Zuhilfenahme eines fokussierbaren Lasers, der im Quellenkollimator zentriert wurde, ein seitlicher Versatz der Strahlposition wurde dann mit Hilfe eines digitalen Wegaufnehmers eingestellt.

## Strahlschwächung und Gasgehalt

Während des Betriebes werden im Heizbereich des mittleren Heizstabes 7/8 der gesamten elektrischen Leistung des Bündels als Wärme an das strömende Fluid abgegeben. Einsetzendes Blasensieden resultiert in einer Zweiphasenströmung, in welcher Gasgehaltsmessungen durchgeführt wurden.

Mit Hilfe der Gammadensitometrie wird eine zeitlich gemittelte integrale Strahlschwächung entlang des Stiftstrahls gemessen. Ist die Schwächung bei komplett flüssigkeitsgefülltem Messobjekt bekannt (Vollreferenzmessung, 0% Gasphase), so kann in einer Zweiphasenströmung die mittlere durchstrahlte Gasstrecke (Gleichung 2) und der Gesamtgasanteil des durchstrahlten Volumens (Gleichung 3) berechnet werden.

Nach dem Schwächungsgesetz

$$\text{ist} \quad \frac{I_L}{I_0} = e^{-(\mu_G d_G + \mu_L d_L + \mu_E d_E)} \quad (\text{Zweiphasenströmung})$$

$$\text{und} \quad \frac{I_{voll}}{I_0} = e^{-(\mu_L D + \mu_E d_E)} \quad (\text{Vollreferenzmessung}).$$

Da die Dichte des gasförmigen RC318 um den Faktor 32 geringer ist, als die des flüssigen, kann der Term  $\mu_G d_G$  vernachlässigt werden und es gilt:

$$\frac{I_L}{I_{voll}} = e^{\mu_L (D - d_L)}$$

Mit  $d_G = D - d_L$  erhält man

$$\frac{I_L}{I_{voll}} = e^{\mu_L \cdot d_G} \quad (1)$$

Die durchstrahlte Gasstrecke ergibt sich zu:

$$d_G = \frac{1}{\mu_L} \ln \frac{I_L}{I_{voll}} \quad (2)$$

Somit ist der Gasgehalt des durchstrahlten Volumens:

$$\varepsilon = \frac{d_G}{D} = \frac{1}{D \cdot \mu_L} \ln \frac{I_L}{I_{voll}} \quad (3)$$

I ... Strahlungsintensität

$\mu$  ... linearer Schwächungskoeffizient

d ... schwächende Länge

D ... maximale schwächende Länge

Indizes:

E ... unveränderliche durchstrahlte Einbauten

G ... gasförmiges RC318

L ... flüssiges RC318



Der lineare Schwächungskoeffizient ist dichte- und damit temperaturabhängig. Er leitet sich aus dem Verhältnis der Schwächung bei einer Leerreferenzmessung (100% Gasphase) zur Schwächung bei Vollreferenzmessungen bei verschiedenen Fluidtemperaturen her: (Gleichung 4)

$$\text{Aus } \frac{I_{\text{voll}}(T)}{I_0} = e^{-(\mu_L(T) \cdot D + \mu_E \cdot d_E)}$$

$$\text{und } \frac{I_{\text{leer}}}{I_0} = e^{-\mu_E \cdot d_E}$$

$$\text{ergibt sich: } \frac{I_{\text{leer}}}{I_{\text{voll}}(T)} = e^{\mu_L(T) \cdot D}$$

$$\text{Damit ist } \mu_L(T) = \frac{1}{D} \ln \frac{I_{\text{leer}}}{I_{\text{voll}}(T)} \quad (4)$$

## Messmatrix

Die am Versuchsstand einstellbaren Parameter sind der Tabelle 2 zu entnehmen. Hier ist zu bemerken, dass sich die jeweiligen fluiddynamischen Grenzwerte zum Teil gegenseitig beeinflussen.

Parameter	Arbeitsbereich	Eingestellte Werte
Vertikale Position	0 bis 300 mm; 0 entspr. Beginn der Heizzone	206,5 mm
Horizontale Position	(-50 mm bis +50 mm; 0 entspr. Bündelmitte	0; 6,0 mm (Strahl tangiert mittlere Stabreihe)
Volumenstrom / Leerrohrgeschwindigkeit	0,2 l/s bis 1,0 l/s, entspr. 0,14 bis 0,71 m/s, temperaturabhängig	0,5 l/s; 0,8 l/s, entspr. 0,35 m/s und 0,56 m/s
Heizleistung/ Wärmestromdichte	0 bis 3,0 kW, entspr. 0 bis 250 kW/m <sup>2</sup>	1,0 kW bis 2,0 kW in 11 Stufen, entspr. 84,4 bis 168,8 kW/m <sup>2</sup>
Unterkühlung der Fluides	6,1 K bis 9,4 K, volumenstromabhängig	6,3K; 9,2K (jew. +/-0,2K)

Tabelle 2: Messparameter Gammadensitometrie

Die Messungen erfolgten in zwei horizontalen Positionen. In Position 1 wurde der Messstrahl zentral durch das Stabbündel geführt (Bild4: rot), in Position 2 mit einem seitlichen Versatz von 6,0 mm (Bild 4: blau). In letzterer Position tangierte der Messstrahl die mittlere Reihe von Heizstäben.

Die Messdauer für jede Einzelmessung betrug 150 s.

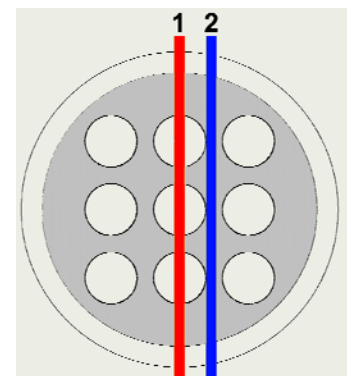


Bild4: Horizontale Lage der Messstrahlen

## Messergebnisse, Interpretation

Zur Bestimmung der temperaturabhängigen Schwächungskoeffizienten wurden eine Leerreferenzmessung sowie für einundzwanzig Temperaturwerte im Bereich zwischen 18,9 °C und 40,1 °C Vollreferenzmessungen durchgeführt. Die berechneten Schwächungskoeffizienten sind im Diagramm 2 dargestellt.

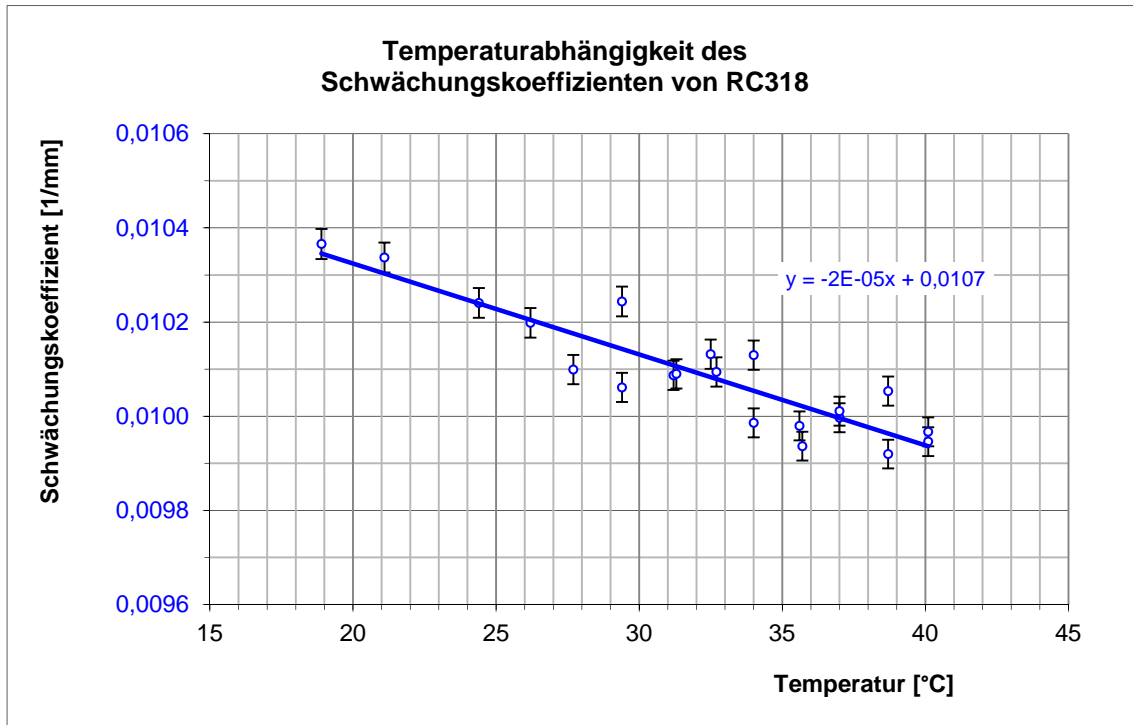


Diagramm 2: Werte für Schwächungskoeffizienten als Punktwolke mit Regressionskurve

Mit den resultierenden Schwächungskoeffizienten wurde für jede Messung der zeitlich gemittelte Gasgehalt berechnet.

Die Ergebnisse für jeweils zwei Leerrohrgeschwindigkeits- und Unterkühlungswerte sind in Diagramm 3 aufgeführt. Die gemessenen Gasstrecken treten an Messposition 1 nahezu ausschließlich in den beiden durchstrahlten Gassen (mittlere Breite 3,1 mm je Gasse) auf. Daraus resultierende lokale Gasgehalte lassen sich der rechten Ordinate entnehmen.

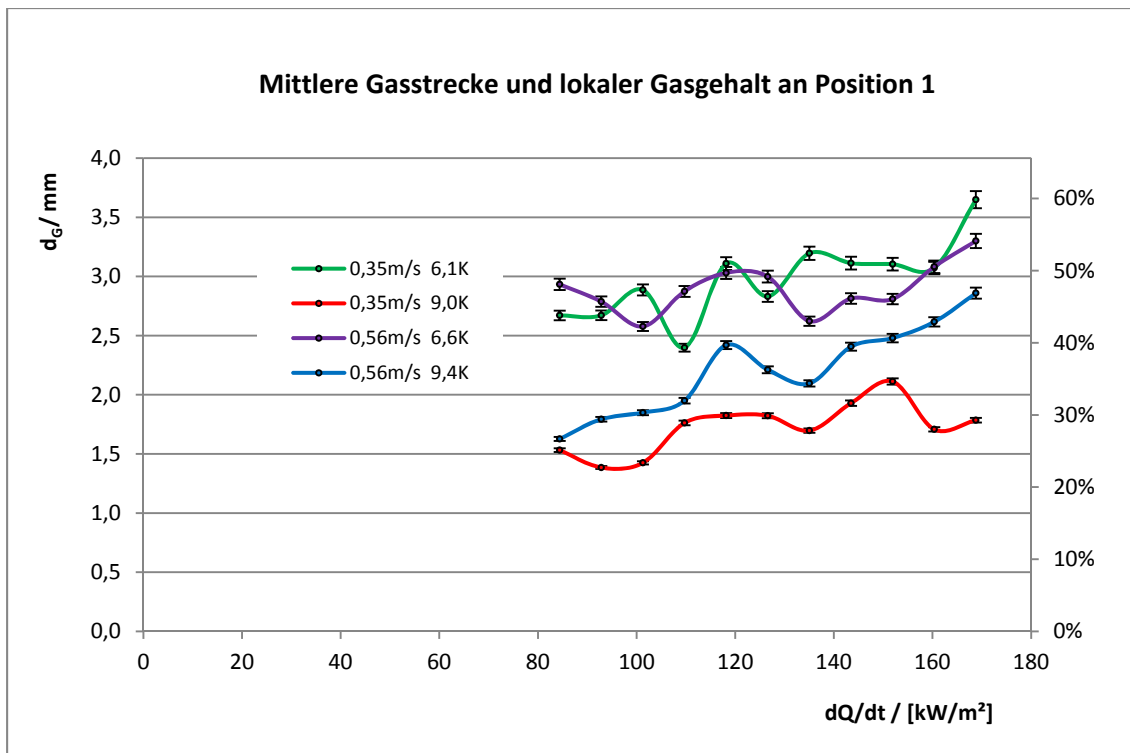


Diagramm 3: Werte bei zentral durch das Stabbündel verlaufendem Messstrahl

Die Daten für Strahlposition 1 zeigen nur eine schwache Abhängigkeit des Gasgehaltes von den Parametern Wärmestromdichte und Volumenstrom. Zur Erhöhung der statistischen Sicherheit wurden die Messungen mit einem Volumenstrom von 0,8 l/s und einer Unterkühlung von 6,6 K wiederholt und mit Messungen geringerer Wärmestromdichte erweitert. Diagramm 4 zeigt eine Zusammenstellung aller Messwerte für diese Kombination von Parametern.

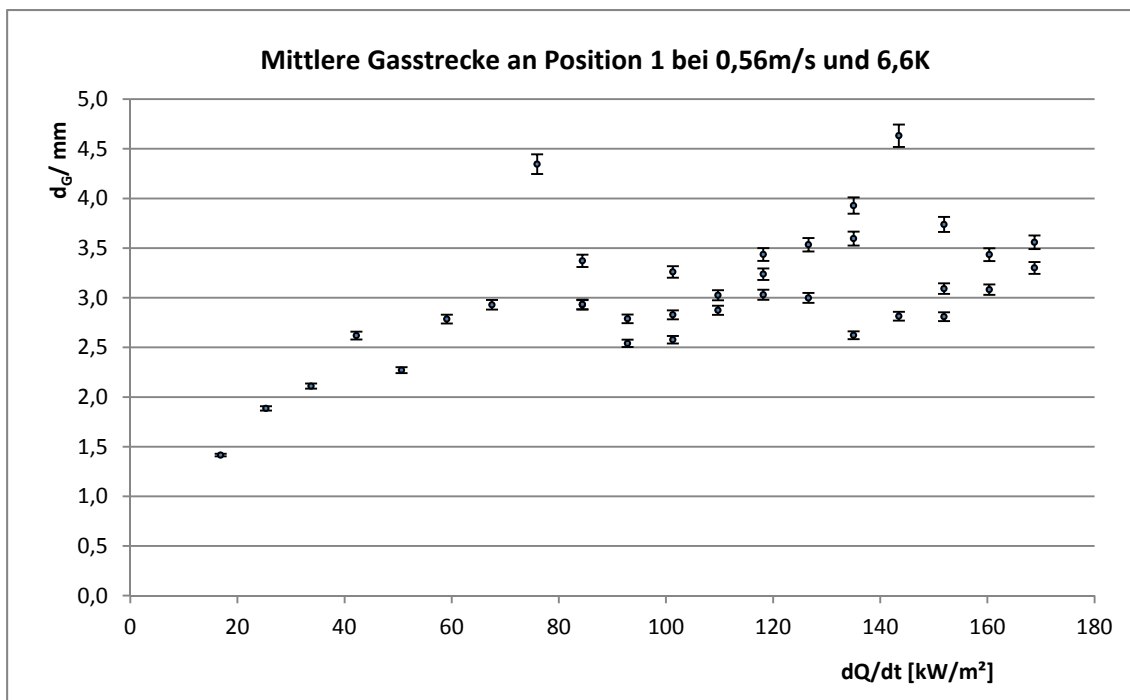


Diagramm 4: Zusammenstellung aller berechneten Gasgehaltswerte bei zentraler Strahlführung unter den aufgeführten Parametern

Dem Verlauf der Messwerte in Diagramm 4 ist eine nichtlineare Abhängigkeit des Gasgehaltes von der Wärmestromdichte zu entnehmen. Während bei geringeren Heizleistungen, die zu Wärmestromdichten bis ca. 80 kW/m<sup>2</sup> führen, ein steiler Anstieg des Gasgehaltes zu beobachten ist, geht dieser oberhalb dieses Wertes allmählich in eine Sättigung über. Hier ist davon auszugehen, dass ein Teil des gasförmigen Fluides seitlich in die Unterkanäle des Bündels driftet. Messungen, die diesen Effekt evaluieren, stehen noch aus.

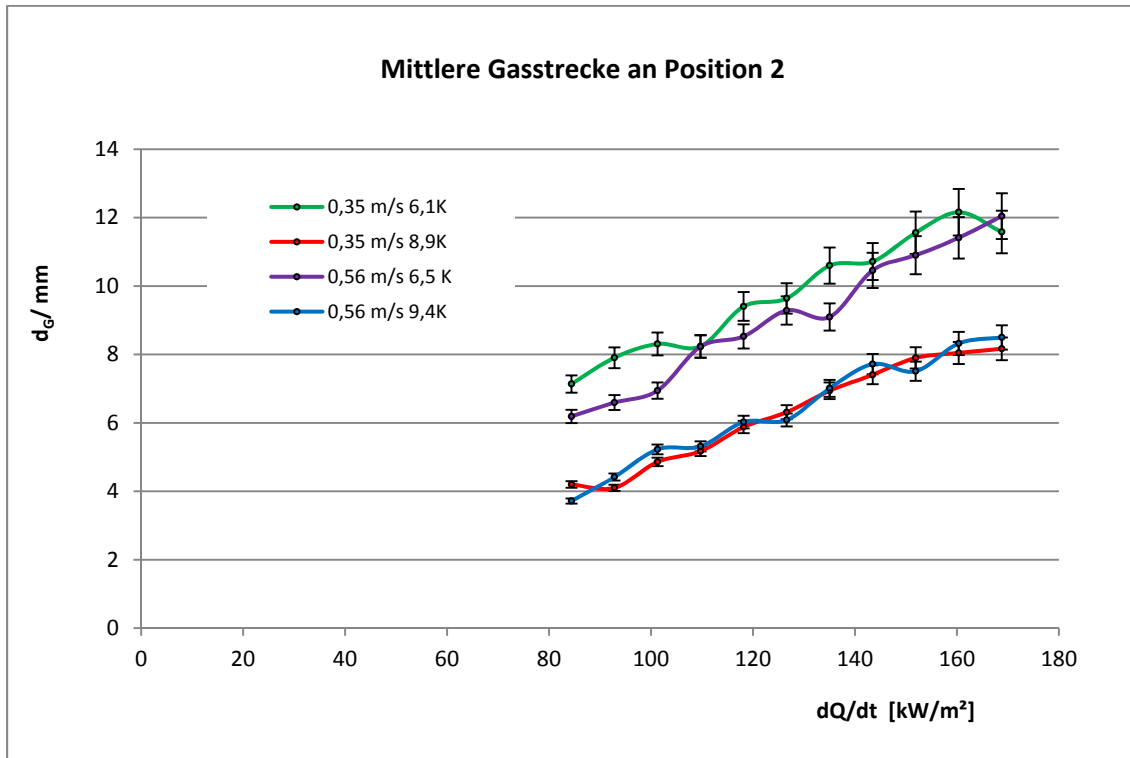


Diagramm 5: Werte bei die mittlere Stabreihe tangierendem Messtrahl

Die Messungen an Position 2 zeigen eine annähernd lineare Korrelation von Wärmestromdichte und Gasgehalt. (s. Diagramm 5) Ein Einfluss von in die hier gemessenen Unterkanäle driftendem Gas ist nicht zu erkennen, da die eingestellten Wärmestromdichten komplett in dem Bereich liegen, in dem das Driften angenommen wird, der Bereich ohne diese Drifteffekte aber nicht durchmessen wurde.

Für beide Messpositionen gilt: Die Wärmestromdichte hat einen deutlich messbaren Einfluss auf den Gasgehalt im strömenden Fluid. Der Einfluss der Unterkühlung des Fluides auf den Gasgehalt ist ebenfalls deutlich messbar und auf die zur Erwärmung bis zum jeweiligen Siedepunkt notwendige Wärmemenge zu erklären. Die Abhängigkeit des Gasgehaltes vom eingestellten Volumenstrom ist jedoch geringer als erwartet, was Gegenstand weitergehender Untersuchungen sein wird.

## Fehlerbetrachtung

### Stochastische Fehler

Grundlage der Bestimmung des stochastischen Fehleranteils sind die in Tabelle 3 aufgeführten gemessenen Größen:

Messgröße	Anzahl detektierter Quanten	Standardabweichung
Leerreferenzmessung an Strahlposition 2	$I_0 = 230000$	$\Delta I_0 = \sqrt{230000}$
Vollreferenzmessung an Strahlposition 2	$I_v = 135000$	$\Delta I_v = \sqrt{135000}$
Strahlweglänge	$D_{max} = 50,6 \text{ mm}$	$\Delta D_{max} = 0,1 \text{ mm}$

Tabelle 3: Durch Referenzmessungen bestimmte Kenngrößen

Nach dem Schwächungsgesetz lässt sich die auf den Sensor treffende Zählrate als

$$I = I_0 e^{-\mu D} \quad (5)$$

darstellen. (D...durchstrahlte Weglänge)

Für die Ermittlung von  $\mu$  gilt dann:

$$\mu = \frac{1}{D_{max}} \ln \frac{I_0}{I_v} \quad (6)$$

$$\underline{\mu = 0,011 \text{ mm}^{-1}}$$

Damit ist:

$$\Delta\mu = \frac{1}{D_{max}} \cdot \left( \frac{\Delta I_0}{I_0} - \frac{\Delta I_v}{I_v} \right) - \frac{\Delta D_{max}}{D_{max}^2} \ln \frac{I_0}{I_v} \quad (7)$$

$$\underline{\Delta\mu = -3,34 * 10^{-5} \text{ mm}^{-1}}$$

Weiterhin folgt aus (5):

$$D = \frac{1}{\mu} \cdot \ln \frac{I_0}{I} \quad (8)$$

Somit ist:

$$\Delta D = \frac{1}{\mu} \cdot \left( \frac{\Delta I_0}{I_0} - \frac{\Delta I}{I} - \frac{\Delta\mu}{\mu} \cdot \ln \frac{I_0}{I} \right) \quad (9)$$

Mit  $void = D_{max} - D$  ist  $\Delta void = -\Delta D$

$$\text{und } \Delta void = -\frac{1}{\mu} \cdot \left( \frac{\Delta I_0}{I_0} - \frac{\Delta I}{I} - \frac{\Delta\mu}{\mu} \cdot \ln \frac{I_0}{I} \right) \quad (10)$$

Unter o.g. Bedingungen ergibt sich bei 140000 gezählten Gamma-Quanten (entspricht einer Gasstrecke von 5,5 mm) eine stochastische Messunsicherheit von

$$\underline{\Delta D_{stoch} = -0,08 \text{ mm}}$$

## Systematische Fehler

Für eine gammadensitometrische Messung wird ein zeitintegraler Wert der detektierten Ereignisse zugrunde gelegt, um eine über dem Messzeitraum linear gemittelte Strahlungsschwächung zu berechnen. Diese Berechnung erfolgt über o.g. Schwächungsgesetz, einer Exponentialfunktion. Der Funktionswert des arithmetischen Mittels von deren Eingangswerten ist nicht das arithmetische Mittel der Ausgangswerte. Demzufolge liefert eine Auswertung nach dem Schwächungsgesetz nur bei hinreichend kleinen Schwankungen des Gasgehaltes und damit der strahlschwächenden Strecke eine genaue Aussage über den mittleren Gasgehalt. (partielle Linearisierung der Exponentialfunktion)

Im Folgenden soll ein Ansatz gefunden werden, der es erlaubt, den darauf basierenden systematischen Fehler zu ermitteln.

Die reale zeitgemittelte strahlschwächende Strecke lässt sich mit

$$\bar{D} = \frac{1}{t_M} \int_{t_0}^{t_M} D(t) dt \quad (11)$$

beschreiben. Desgleichen gilt für die Zählrate

$$I = \frac{1}{t_M} \int_{t_0}^{t_M} I(t) dt \quad (12)$$

Mit  $I(t) = I_0 e^{-\mu D(t)}$  erhält man:

$$I = \frac{I_0}{t_M} \int_{t_0}^{t_M} e^{-\mu D(t)} dt \quad (13)$$

Wenn sich die berechnete (fehlerbehaftete) strahlschwächende Strecke aus

$$\check{D} = \frac{1}{\mu} \cdot \ln \frac{I_0}{I} \quad (14)$$

ergibt, führt ein Einsetzen von (13) zu:

$$\check{D} = -\frac{1}{\mu} \cdot \ln \left( \frac{1}{t_M} \int_{t_0}^{t_M} e^{-\mu D(t)} dt \right) \quad (15)$$

Der systematische Fehler lässt sich dann als Differenz zwischen (11) und (15), also mit

$$\Delta D = \frac{1}{t_M} \int_{t_0}^{t_M} D(t) dt + \frac{1}{\mu} \cdot \ln \left( \frac{1}{t_M} \int_{t_0}^{t_M} e^{-\mu D(t)} dt \right) \quad (16)$$

beschreiben. Da eine analytische Darstellung von  $D(t)$  in den seltensten Fällen gegeben ist, führt hier eine Grenzwertbetrachtung weiter. Eine maximale Abweichung des berechneten Ergebnisses von der realen mittleren void – Strecke ist dann gegeben, wenn während der Messung nur zwei Schwächungswerte im Wechsel auftreten. Diese führen zu zwei im Wechsel auftretenden Strahlintensitäten  $I_{\min}$  und  $I_{\max}$  mit den zeitlichen Anteilen  $k$  und  $(1-k)$  mit  $0 < k < 1$ . Gesucht wird der Wert von  $k$ , für den der systematische Fehler  $\Delta D$  maximal ist.

Gleichung 14 wird zu:

$$\check{D} = \frac{1}{\mu} \cdot \ln \frac{I_0}{k \cdot I_{min} + (1-k) \cdot I_{max}} \quad (17)$$

Und die reale strahlschwächende Strecke:

$$\bar{D} = (1 - k) \cdot D_{min} + k \cdot D_{max} \quad (18)$$

Hier lässt sich der systematische Fehler als Differenz zwischen (17) und (18), also mit

$$\Delta D = D_{min} + k(D_{max} - D_{min}) + \frac{1}{\mu} \cdot \ln(e^{-\mu D_{min}} + k(e^{-\mu D_{max}} - e^{-\mu D_{min}})) \quad (19)$$

beschreiben. Im Bereich der gemessenen Werte für den Gasgehalt ergibt sich ein Maximum von  $\Delta D$  bei

$$\underline{k \approx 0,5}$$

Es lässt sich zeigen, dass die reale Strecke im Gasanteil dann durch

$$\overline{void} = \frac{1}{2\mu} \cdot \ln(2e^{\mu \cdot \overline{void}} - 1) \quad (20)$$

beschrieben werden kann.

$\overline{void}$  ... berechnete (fehlerbehaftete) Strecke im Gasanteil

$\bar{void}$  ... reale (korrigierte) Strecke im Gasanteil

Bei einer berechneten zeitgemittelten Void-Strecke von 5mm und einem Schwächungskoeffizienten von  $0,011\text{mm}^{-1}$  ergibt sich unter den o.g. Bedingungen ein maximaler systematischer Fehler von 2,38% bzw.

$$\underline{\Delta D_{\text{syst}} = 0,12 \text{ mm.}}$$

Damit beträgt der maximale Gesamtfehler:

$$\Delta D_{\text{ges}} = |\Delta D_{\text{stoch}}| + |\Delta D_{\text{syst}}| = 0,2\text{mm}$$