

Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben So 204/12-2

„Transporteffekte in partikelbeladenen Kanalströmungen“

Prof. Dr.-Ing. M.Sommerfeld

Fachbereich Ingenieurwissenschaften
Institut für Verfahrenstechnik
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Geusaer Straße
06217 Merseburg

Berichtszeitraum: Juni 1999 bis Juni 2001

1 Zusammenfassung

Die experimentellen Arbeiten bezogen sich in der ersten Projektphase hauptsächlich auf Transporteffekte in einer mit kleinen Partikeln ($D_p = 60 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$ und $195 \mu\text{m}$) beladenen Kanalströmung (technologische Daten: siehe Zwischenbericht). Weiterführende Untersuchungen wurden allerdings auch in der zweiten Projektphase durchgeführt.

Das Bewegungsverhalten großer sphärischer Partikel mit mittleren Durchmessern von $D_p = 625 \mu\text{m}$ und $1000 \mu\text{m}$ und deren Einfluss auf die kontinuierliche Phase bezüglich ihrer Geschwindigkeit und ihrer Schwankungsgeschwindigkeit, wurden in der zweiten Projektphase untersucht. Weiterhin konnten die Folgen der Änderung der Wandrauigkeit auf die Geschwindigkeiten der Gasphase und der Feststoffphase untersucht werden. Tabelle 1 verdeutlicht die abgearbeitete Versuchsmatrix.

Mit Hilfe einer CCD-Kamera konnten Strömungsstrukturen der kontinuierlichen Phase im Flachkanal sichtbar gemacht werden. Die Messung des Druckverlaufes im Flachkanal bei unterschiedlich großen Partikeln und bei verschiedenen Beladungen, war ein weiterer Gegenstand der experimentellen Arbeiten in der zweiten Projektphase.

Schließlich wurden die in der ersten Projektphase entwickelten Modelle zur Beschreibung von Partikel-Wand- und Partikel-Partikel-Stößen in numerische Berechnungsprogramme auf der Basis des Euler/Lagrange-Ansatzes implementiert und validiert. Um sowohl die Turbulenzdämpfung für kleine Partikel als auch die Turbulenzanfächerung bei großen Partikeln zu berücksichtigen, wurden verschiedene Modellansätze getestet.

Tabelle 1: Zusammenstellung der durchgeführten Versuche bei unterschiedlichen Randbedingungen (* Nur die Gasphase wurde gemessen, da die Partikelgröße außerhalb des Messbereiches lag; R1: niedrige Rauigkeit ($4,3 \mu\text{m}$), R2 hohe Rauigkeit ($7,0 \mu\text{m}$))

Mittlere Partikelgröße [μm]	Beladungen von - bis	Mittlere Geschwindigkeit U_{mittel} der unbeladenen Luft [m/s]	Wandrauigkeit
60	0,039 – 0,195	20,0	R1
100	0,1 – 1,0	14,25; 19,62; 25,6	R1 und R2
195	0,1 – 1,0	10,2; 19,7	R1 und R2
625	1,0 – 1,95	19,1	R1
1000*	0,1 – 2,0	19,89	R1

2 Experimentelle Ergebnisse

2.1 Einfluß der Wandrauigkeit bei einer partikelbeladenen Kanalströmung

Bei den durchgeführten Experimenten im Flachkanal wurden zwei unterschiedliche Wandrauigkeiten verwendet. Ihre mittleren Rauigkeitstiefen liegen bei $4,3 \mu\text{m}$ ($R_1 =$ glatte Wand) und $R_Z = 7,0 \mu\text{m}$ ($R_2 =$ rauhe Wand). In Abb.1 sind die beiden Rauigkeitsprofile dargestellt. Die Wandrauigkeit der Kanalwand hat einen entscheidenden Einfluß auf das Bewegungsverhalten von Partikeln (Sommerfeld 2002). Mit steigender Wandrauigkeit erhöht sich die Partikel/Wand-Kollisionsfrequenz, was mit einem entsprechenden Impulsverlust der Partikel und einem erhöhten Druckverlust verbunden ist.

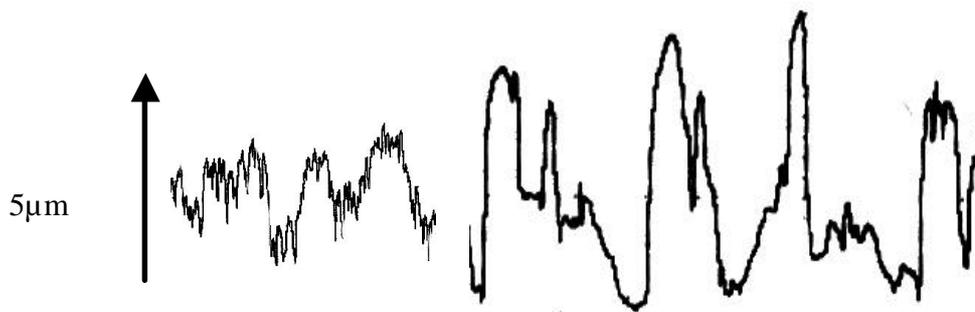


Abb.1) Rauigkeitsprofile der Wand a) glatte Wand $R_Z = 4,3 \mu\text{m}$ b) rauhe Wand $R_Z = 7,0 \mu\text{m}$

Aus diesem Grund ergibt sich mit steigender Wandrauigkeit eine Abnahme der horizontalen Partikelgeschwindigkeit (Kussin & Sommerfeld 2000). Der Einfluß der Wandrauigkeit auf das vertikale Profil der horizontalen Geschwindigkeitskomponente für verschiedene Partikelgrößen ist in Abb.2 dargestellt.

Bei zunehmender Partikel/Wand-Kollisionsfrequenz, hervorgerufen durch eine größere Wandrauigkeit, steigt weiterhin die Energie (E_P) der Partikelschwankungsgeschwindigkeit, welche sich ergibt aus:

$$E_P = \frac{0.5 \times (\overline{u_P^2} + \overline{v_P^2})}{U_{\text{mittel}}^2}$$

Der deutliche Energieunterschied der Partikelschwankungsgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Wandrauigkeiten und unterschiedlicher Partikelgröße, in Abhängigkeit von der Beladung, wird in Abb. 3 sichtbar. Mit steigender Beladung wird die Energie der Partikelschwankungsbewegung weiterhin durch die steigende Partikel/Partikel-Kollisionsfrequenz dissipiert, was zu einer deutlichen Reduzierung führt.

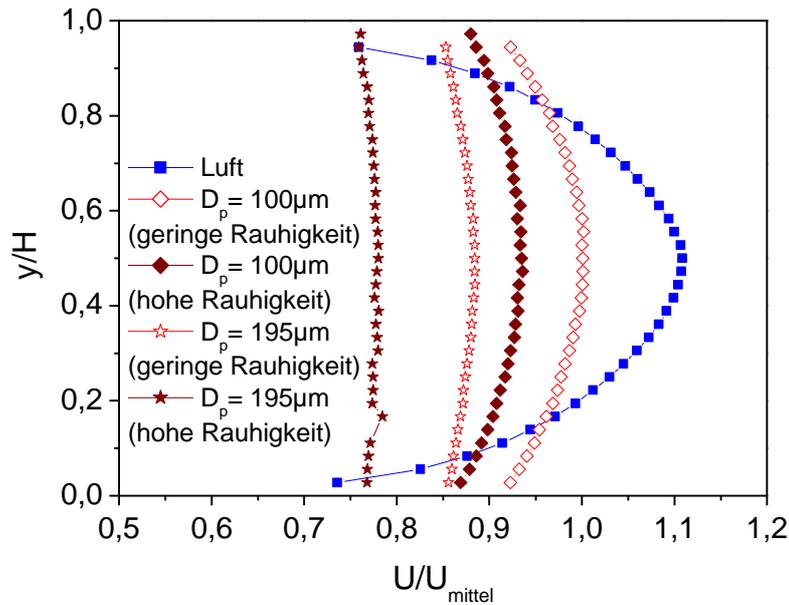


Abb.2) Einfluß der Wandrauhigkeit auf das vertikale Profil der horizontalen Geschwindigkeitskomponente der Feststoffphase bei unterschiedlich großen Partikeln ($U_{\text{mittel}} = 19,7 \text{ m/s}$, $h = 1,0$).

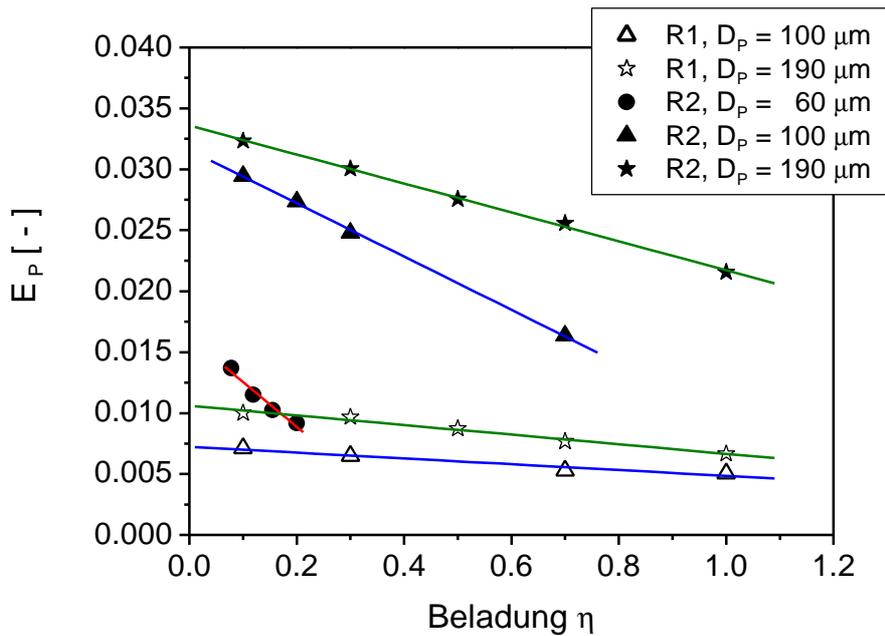


Abb.3) Mittlere Energie der Partikelschwangungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Beladung für unterschiedliche Wandrauhigkeiten (glatte Wand R1 und raue Wand R2) und verschiedene Partikelgrößen, $U_{\text{mittel}} = 19,7 \text{ m/s}$

Ebenso reduziert sich die Energie der Partikelschwankungsbewegung mit der Beladung deutlich stärker für eine höhere Rauigkeit. Steigt die Wandrauhigkeit von R1 auf R2 an, so erhöht sich die Schwankungsbewegung der Partikel und damit nimmt die Partikelkollisionsfrequenz zu, was zu einer stärkeren Dämpfung mit steigender Beladung führt. Ein kleinerer

Partikeldurchmesser hat, bei konstanter Beladung der Luft, eine größere Anzahldichte zur Folge. Daher liegt die Partikel/Partikel-Kollisionsfrequenz höher und die Energie der Partikelschwankungsgeschwindigkeit nimmt deutlich stärker ab als bei großen Partikeln. Dies gilt insbesondere für die höhere Wandrauigkeit.

Es ist bekannt, daß bei kleineren Partikeln die Turbulenz der Gasphase infolge der Kopplung mit steigender Beladung abnimmt. Neben der Höhe der Feststoffbeladung wird die Turbulenz der Luft auch von der Rauigkeit der Kanalwand indirekt beeinflusst. In Abb. 4 ist die Abhängigkeit der normierten Schwankungsgeschwindigkeit von der Partikelgröße, der Feststoffbeladung und der Rauigkeit der Kanalwand aufgetragen. Bei den kleineren Partikeln, $D_p = 100 \mu\text{m}$ und $195 \mu\text{m}$, und höheren Beladungen wird der Wandrauigkeitseinfluß deutlich sichtbar. Durch eine höhere Wandrauigkeit nimmt die Partikelkollisionsfrequenz mit der Wand deutlich zu und die mittlere Partikelgeschwindigkeit wird reduziert. Durch die resultierende stärkere Kopplung der Phasen ergibt sich eine Abnahme der mittleren normierten Schwankungsgeschwindigkeit der Luft mit zunehmender Wandrauigkeit. Für eine konstante Beladung wird mit abnehmender Partikelgröße die Turbulenzdämpfung deutlich erhöht. Bei großen Partikeln kommt es im Mittel zu einem Übergang von einer Turbulenzdissipation hin zur Turbulenzanfächerung, was einen Anstieg der normierten Schwankungsgeschwindigkeit der Luft bei den $625 \mu\text{m}$ Partikeln zur Folge hat. Die hier dargestellten Ergebnisse zeigen erstmalig, daß die Wandrauigkeit einen Einfluß auf Turbulenzbeeinflussung der kontinuierlichen Phase hat.

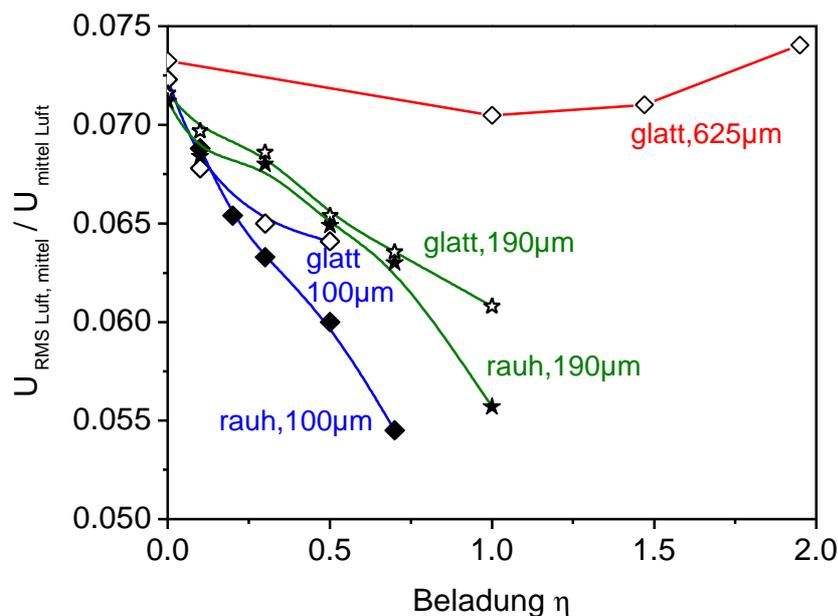


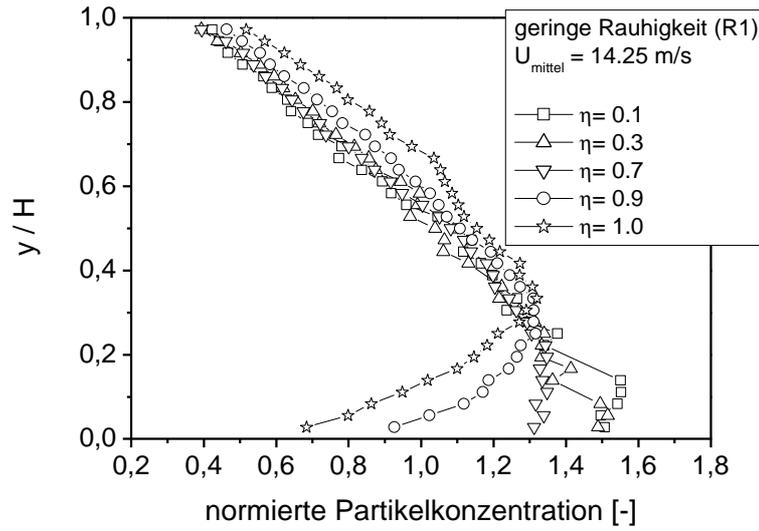
Abb.4) Normalisierte horizontale Schwankungsgeschwindigkeit der Luft (über die Kanalhöhe gemittelt) in Abhängigkeit von der Beladung, der Wandrauigkeit R1 und R2 und der Partikelgröße ($U_{\text{mittel}} = 19.7 \text{ m/s}$)

2.2 Änderung des Konzentrationsverlaufs der Partikel mit der Beladung und der Wandrauigkeit

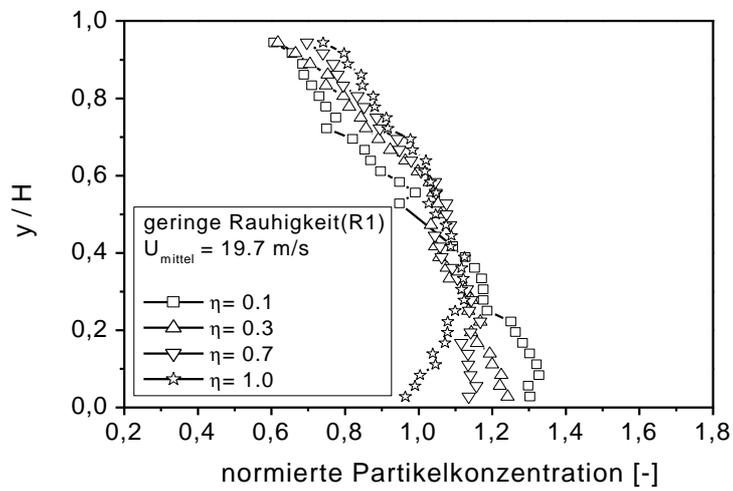
Das Konzentrationsprofil der Partikel ist eine charakteristische Eigenschaft für die Beschreibung von Gas-Feststoff-Strömungen. Der Verlauf des Profils ist von mehreren Faktoren abhängig. Dabei spielen die mittlere Transportgeschwindigkeit der Partikel, die Wandrauigkeit und die Beladung eine entscheidende Rolle. In Abb. 5 sind diese Abhängigkeiten dargestellt. Bei einer geringen Wandrauigkeit ist der Einfluß der Beladung und damit der Partikelkollision auf das Konzentrationsprofil deutlich sichtbar (Abb. 5a). Ist die Beladung gering, bildet sich als Folge des schwerkraftbedingten Sedimentierens eine annähernd lineare Zunahme der Konzentration von der oberen Kanalwand zum Kanalboden aus. Steigt die Beladung an, kommt es zu einer Redispersion, und die Lage des Konzentrationsmaximums verschiebt sich zur Kanalmitte. Die Ursache für diese Änderung ist die Zunahme der Partikelstöße. Partikel, die nach einer Wandkollision mit dem Boden nach oben springen, kollidieren mit Partikeln, die sich in Richtung Kanalboden bewegen. Da diese Partikel durch die Kollision nicht zum Kanalboden gelangen, kommt es zur Bildung eines Konzentrationsmaximums bei etwa $y/H = 0,2-0,3$. Dieses Maximum verschiebt sich mit steigender Beladung in Richtung Kanalmitte. Erhöht sich die mittlere Transportgeschwindigkeit, so wird der Einfluß der Partikel/Partikel-Kollision auf das Konzentrationsprofil kleiner (Abb. 5b). Die Änderung der Konzentration im Bereich des Kanalbodens bei steigender Beladung wird daher kleiner.

Erhöht sich die Wandrauigkeit, wird das Bewegungsverhalten der Partikel durch Partikel/Wand-Kollisionen dominiert (Abb. 5c), und die Feststoffkonzentration ändert sich nur geringfügig über der Kanalhöhe. Mit steigender Beladung und damit zunehmender Partikelstoßfrequenz ergibt sich nur eine geringfügige Änderung. Bei den hier durchgeführten Untersuchungen konnte dieser Effekt, welcher die Folge von Partikelstößen ist, erstmalig quantifiziert werden.

a)



b)



c)

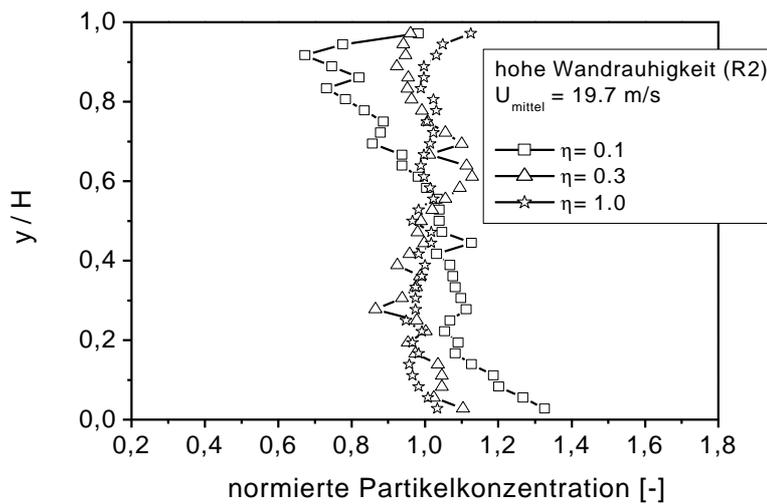


Abb.5) Vertikales Profil der normalisierten Partikelkonzentration ($D_p = 100 \mu\text{m}$) für unterschiedliche Bedingungen a) geringe Rauigkeit (R1), $U_{\text{mittel}} = 14,25 \text{ m/s}$, b) geringe Rauigkeit (R1), $U_{\text{mittel}} = 19,7 \text{ m/s}$, c) hohe Rauigkeit (R2), $U_{\text{mittel}} = 19,7 \text{ m/s}$

2.3 Einfluß großer Partikel auf die Gasphase

Bei großen sphärischen Partikeln (Partikel-Reynoldszahlen größer als ca. 350) ergibt sich durch Nachläufe der Partikel eine Anfachung der Turbulenz (Gore & Crowe 1989). Dieser Effekt äußert sich auch in einem Anstieg der RMS-Werte der kontinuierlichen Phase.

In Abb. 6 sind die Profile der horizontalen Schwankungsgeschwindigkeit der Gasphase und Feststoffphase (nur für 625 μm Partikel) dargestellt. Die Schwankungsgeschwindigkeit der Feststoffphase nimmt mit steigender Beladung, als Folge der steigenden Partikel/Partikel-Kollision, über dem gesamten Kanalquerschnitt ab. Die Schwankungsgeschwindigkeit der Luft erhöht sich im Kanalzentrum mit steigender Partikelbeladung. Die Ursache liegt in diesem Bereich in einer periodischen Nachlaufablösung bei großen Partikeln. Der Anstieg der Schwankungsgeschwindigkeit ist bei einer Beladung der Luft mit 1000 μm großen Partikeln erwartungsgemäß höher als bei 625 μm großen Partikeln. Im oberen und unteren Drittel des Kanals ist allerdings noch eine deutliche Turbulenzdämpfung zu beobachten.

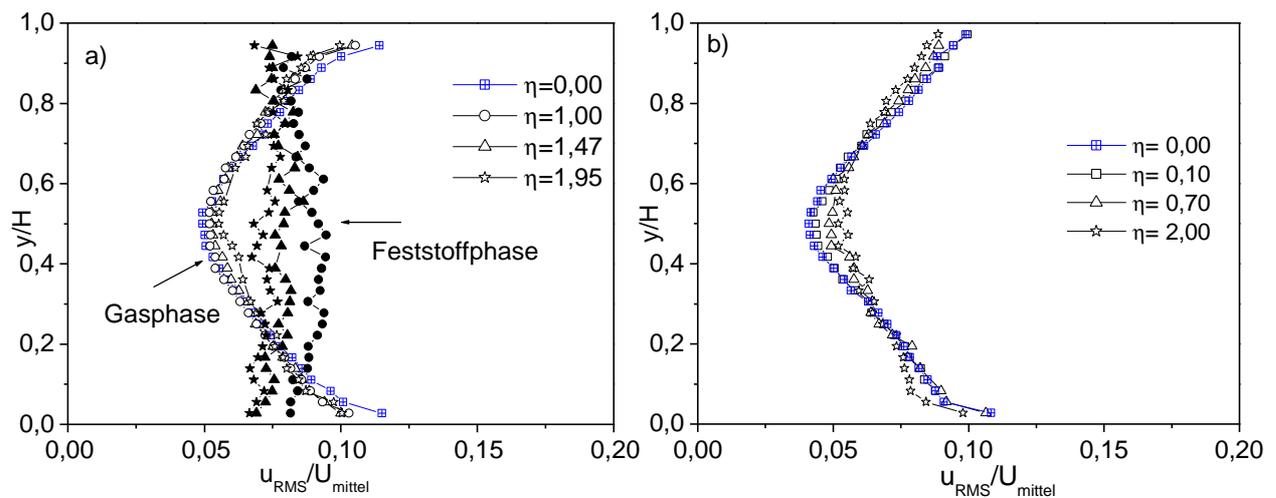


Abb.6) Normiertes vertikales Profil der horizontalen Schwankungsgeschwindigkeit der Feststoffphase und der Gasphase ($U_{\text{mittel}} = 19,1\text{m/s}$), a) $D_p = 625 \mu\text{m}$, b) $D_p = 1000 \mu\text{m}$

Dies ist die Folge der geringeren Relativgeschwindigkeit und somit auch der Partikel-Reynoldszahl (Abb. 7a). Nur im Zentrum des Kanals ist die Partikel-Reynoldszahl für das Entstehen einer periodischen Nachlaufablösung groß genug. In der Nähe der Kanalwände sinkt die Partikel-Reynoldszahl soweit ab, daß es zu keiner Turbulenzentfaltung kommen kann. Bei einer Beladung der Luft mit 195 μm großen Partikeln ist die Partikel-Reynoldszahl über dem gesamten Kanalquerschnitt zu gering für eine Turbulenzentfaltung bzw. es entsteht keine ausgeprägte Nachlaufablösung (Kussin & Sommerfeld 2001).

Der Einfluß der Partikelbeladung auf das vertikale Profil der horizontalen Geschwindigkeitskomponente wird aus Abb. 7b deutlich. Durch steigende Beladung der Gasphase kommt es zu einer Abflachung des Profils. Da die Partikelkollisionsfrequenz mit der Beladung zunimmt, müssen die Partikel nach jeder Kollision (Partikel/Partikel-Kollision und Partikel/Wand-Kollision) neu beschleunigt werden, was zu einem entsprechenden Impulsverlust führt. Durch die Beschleunigung der Partikel kommt es zu einem stärkeren Impulstransfer von der Feststoffphase zur Gasphase.

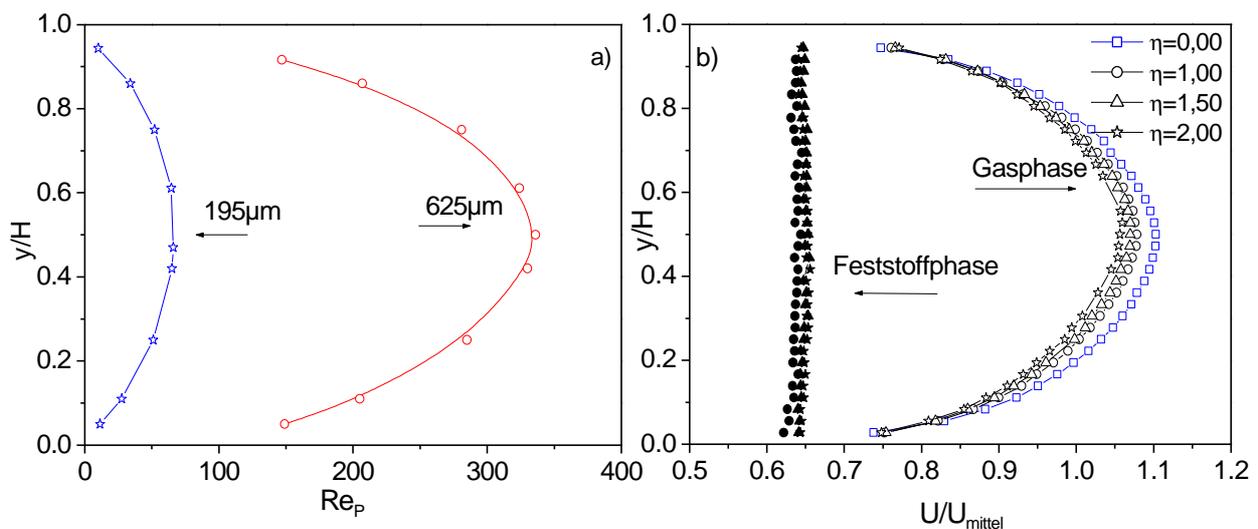


Abb.7) a) Vertikale Profile der Partikel-Reynoldszahl für zwei verschiedene Partikelgrößen bei einer Massenbeladung von 1.0 b) Vertikales Profil der horizontalen Geschwindigkeitskomponente der Gasphase und der Feststoffphase ($U_{\text{mittel}} = 19,1\text{m/s}$; $D_p = 625\mu\text{m}$) bei unterschiedlicher Beladung.

2.4 Untersuchung der Turbulenzmodifikation mit Hilfe von Turbulenzspektren

Zur weiteren Interpretation der Turbulenzbeeinflussung durch die Feststoffpartikel wurden aus den Zeitreihen der PDA-Messungen Turbulenzspektren, also die Verteilung der turbulenten kinetischen Energie auf die Frequenz, ermittelt. Die gemessene turbulente kinetische Energie der Gasphase entspricht bei einer derartigen Auftragung dem Integral des Energiespektrums über den gesamten Frequenzbereich der Schwankungsbewegung (Nobach et al. 1998).

Am Beispiel der Beladung der Gasströmung mit $625\mu\text{m}$ und $195\mu\text{m}$ großen Partikeln soll die Turbulenzmodifikation mit Hilfe der Turbulenzspektren erläutert werden. In Abb. 8 sind die Turbulenzspektren für die $625\mu\text{m}$ Partikeln dargestellt. Für größere Frequenzen (> 60

Hz), also kleinere Wirbelstrukturen, ergibt sich im Zentrum des Kanals eine deutliche Erhöhung der spektralen Energie mit steigender Beladung. Dies korrespondiert mit den gemessenen Schwankungsgeschwindigkeiten in Strömungsrichtung (Abb. 6a)

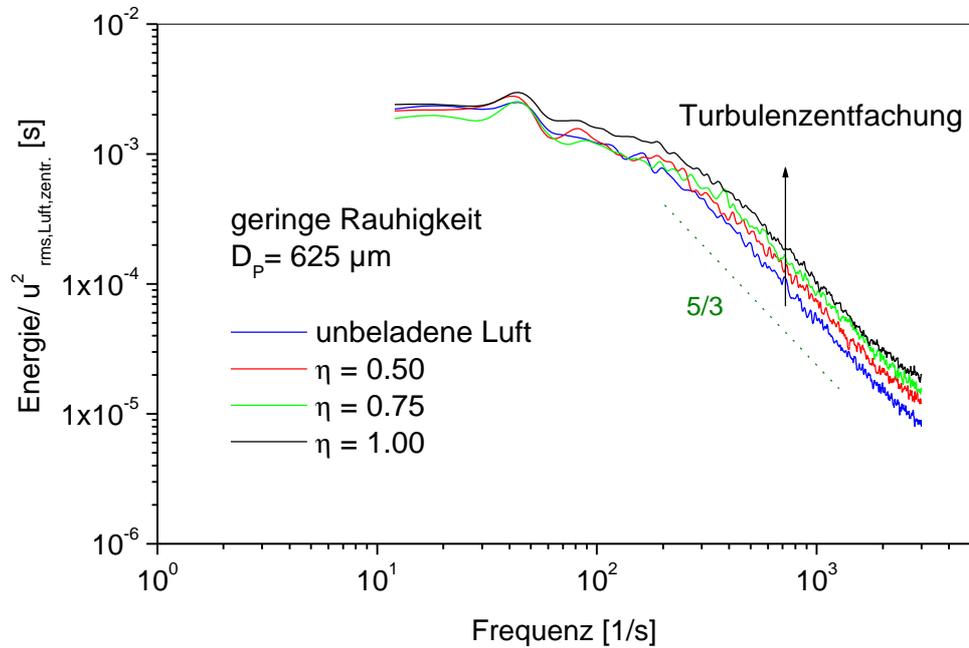


Abb.8) Frequenzspektrum der horizontalen Geschwindigkeitskomponente im Zentrum des Kanals bei verschiedenen Feststoffbeladungen ($U_{\text{mittel}} = 19,7 \text{ m/s}$, $D_p = 625 \mu\text{m}$).

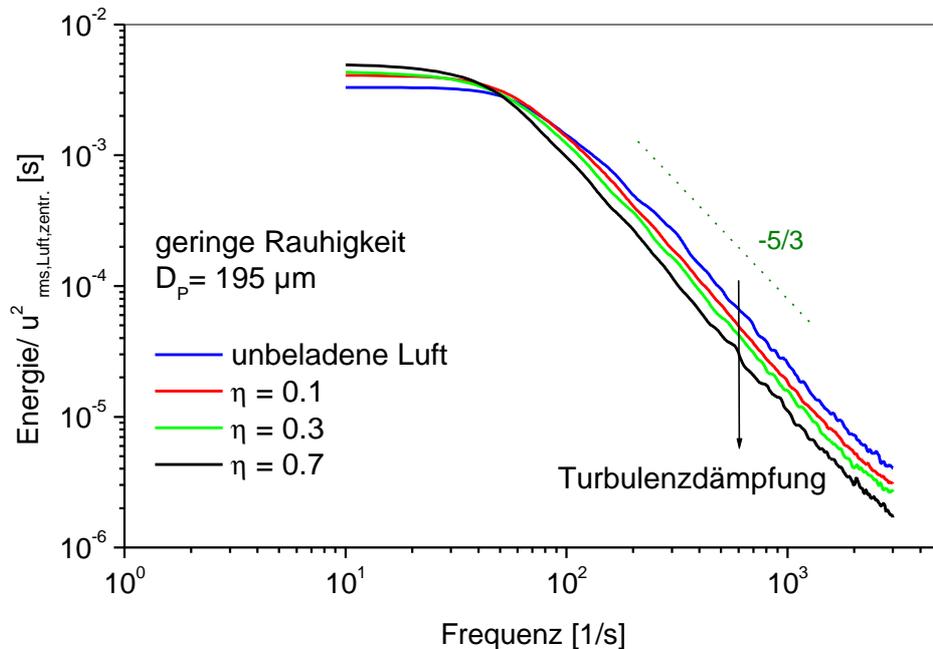


Abb.9) Frequenzspektrum der horizontalen Geschwindigkeitskomponente im Zentrum des Kanals bei verschiedenen Feststoffbeladungen ($U_{\text{mittel}} = 19,7 \text{ m/s}$, $D_p = 195 \mu\text{m}$).

Bei einer Beladung mit kleineren Partikeln, kommt es zu einer ausgeprägten Turbulenzdämpfung. In Abb. 9 ist der Verlauf für die horizontale Geschwindigkeitskomponente im Zentrum des Kanals bei verschiedenen Feststoffbeladungen aufgetragen. Im Bereich einer Wirbelfrequenz oberhalb von ca. 50 Hz wird eine deutliche Turbulenzdämpfung beobachtet. Das Integral der einzelnen Kurven, und somit die Energie der horizontalen Komponente der Schwankungsgeschwindigkeit, sinkt daher mit steigender Beladung.

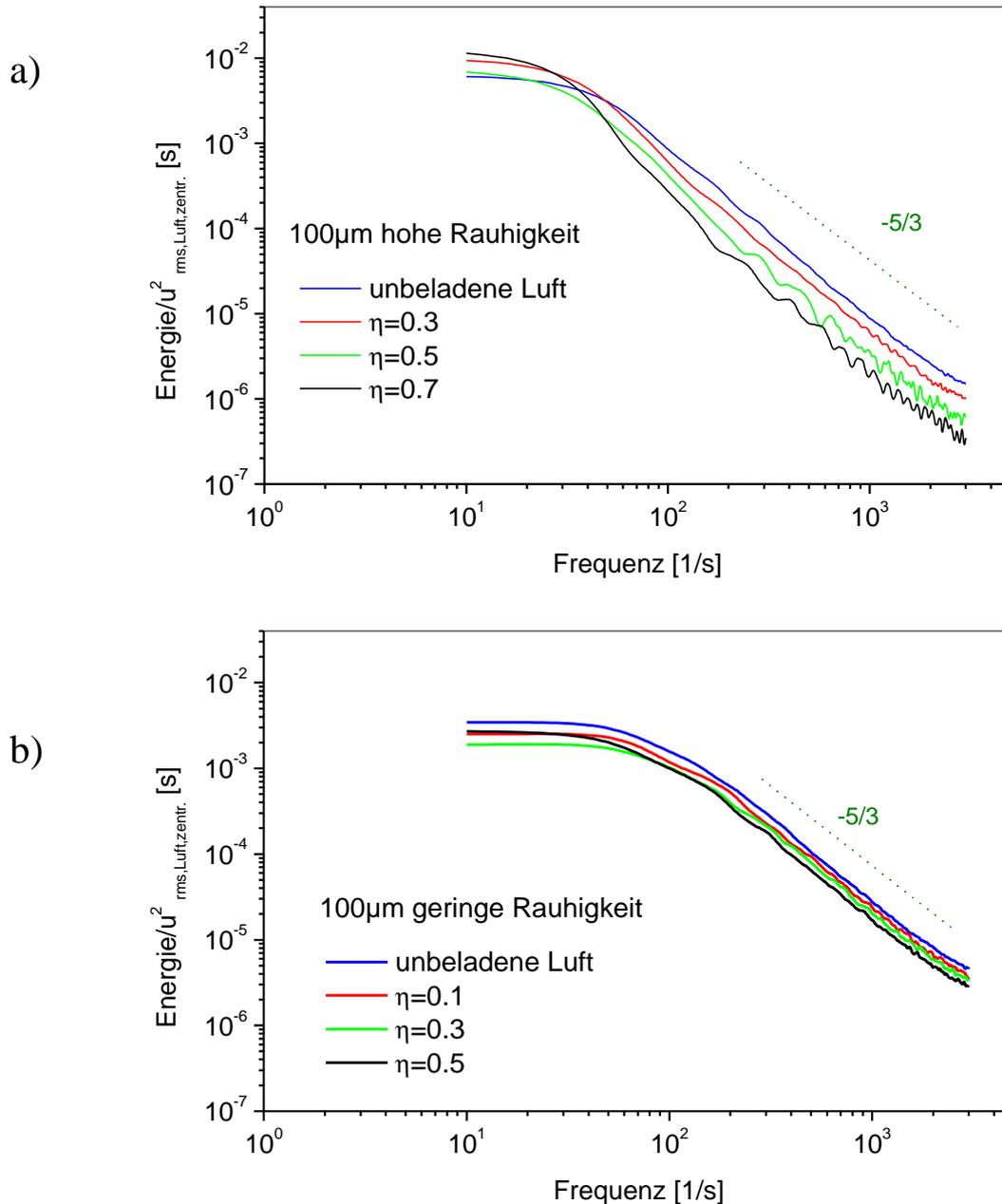


Abb.10) Frequenzspektrum der horizontalen Geschwindigkeitskomponente im Zentrum des Kanals bei verschiedenen Feststoffbeladungen und unterschiedlichen Wandrauigkeiten a) hohe Wandrauigkeit b) geringe Wandrauigkeit; ($U_{\text{mittel}} = 19,7 \text{ m/s}$, $D_P = 100 \mu\text{m}$).

Bei einem Vergleich der Turbulenzspektren mit unterschiedlichen Wandrauigkeiten (Abb. 10) wird eine deutliche Änderung des Verlaufs der Turbulenzspektren sichtbar. Die hohe Wandrauigkeit resultiert in einer wesentlich stärkeren Turbulenzdämpfung mit steigender Feststoffbeladung. Die Ursache für diesen Effekt liegt in der Zunahme der Partikel/Wand-Kollisionsfrequenz durch erhöhte Wandrauigkeit. Dies führt, wie schon zuvor bemerkt, zu einem erhöhten Impulsverlust für die Partikelphase und damit zu einer stärkeren Rückwirkung der Partikel auf die mittlere Gasgeschwindigkeit und die Turbulenz (Kussin & Sommerfeld 2002)

3 Untersuchung der Druckänderung in Abhängigkeit von der Feststoffbeladung und Partikelgröße

Mit Drucksensoren der Fa. BAUMER Electric wurde in einem Abstand von jeweils 1m der statische Druck entlang der Kanalwand gemessen. Verschiedene Partikelgrößen und Feststoffbeladungen kamen dabei zum Einsatz. Am Beispiel der 195 μm großen Partikel soll der Einfluß der Partikel auf den Druckverlauf im Flachkanal bei einer geringen Wandrauigkeit (R1) erläutert werden. Da der Austausch der Kanalwände relativ aufwendig ist, konnten bisher noch keine Druckmessungen bei höheren Rauigkeiten durchgeführt werden. Diese Messungen werden im Zuge der weiteren Untersuchungen erfolgen.

Mit steigender Feststoffbeladung erhöht sich der statische Druck im gesamten Flachkanal (Abb. 11). Dabei wird deutlich, daß eine lineare Abhängigkeit zwischen der Feststoffbeladung und dem daraus resultierenden Druckanstieg besteht. Demnach besteht ebenfalls eine lineare Abhängigkeit zwischen der Kollisionsfrequenz der Partikel und dem Druckanstieg im Flachkanal. Diese Linearität kann bei verschiedenen Partikelgrößen nachgewiesen werden.

Wie zu erwarten, fällt der statische Druck mit steigender Kanallänge ab (Abb. 12). Dieser Druckverlust wird durch die Wandreibung verursacht. Beim Vergleich des statischen Drucks (normiert auf den Eingangsdruck) für verschiedene Beladungen und unterschiedliche Partikelgrößen wird der sich ändernde Anstieg der linearen Abhängigkeiten sichtbar (Abb. 13). Da große Partikel (195 μm) eine höhere Kollisionsfrequenz mit der Wand besitzen, findet ein stärkerer Impulsaustausch zwischen der Feststoffphase und dem Gas statt (Sommerfeld, et al. 1999). Weiterhin führt die Trägheit größerer Partikel zu einem erhöhten Schlupf und damit resultiert ein ausgeprägterer Druckverlust. Bei kleineren Partikeln reduziert sich der Schlupf

und die Wandkollisionsfrequenz wird reduziert. Dies resultiert in einem geringeren Druckanstieg.

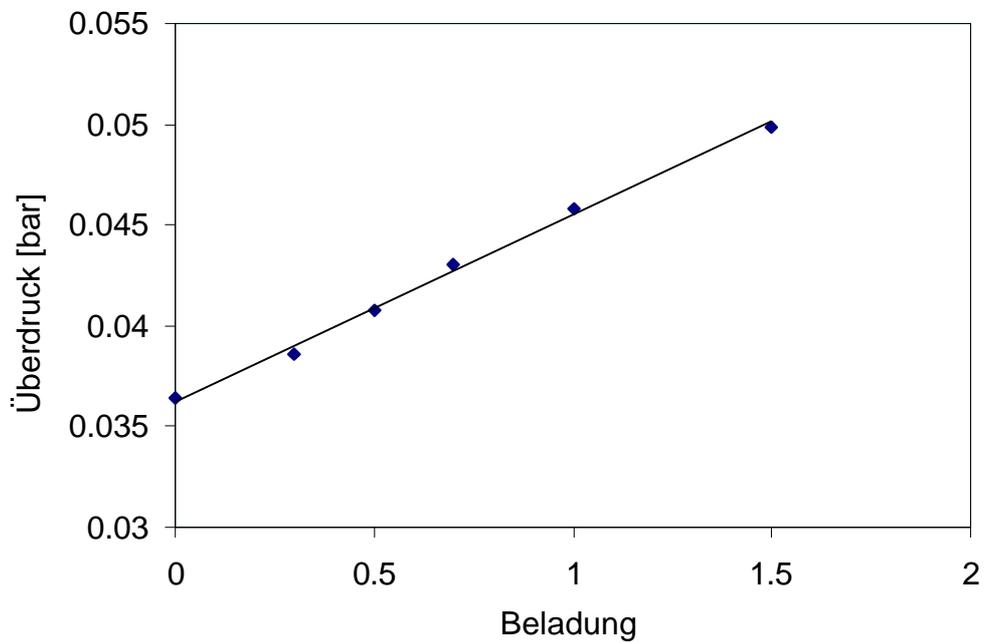


Abb.11) Statischer Druck in Abhängigkeit von der Feststoffbeladung bei 195 µm Partikeln, gemessen am Ende des Kanals

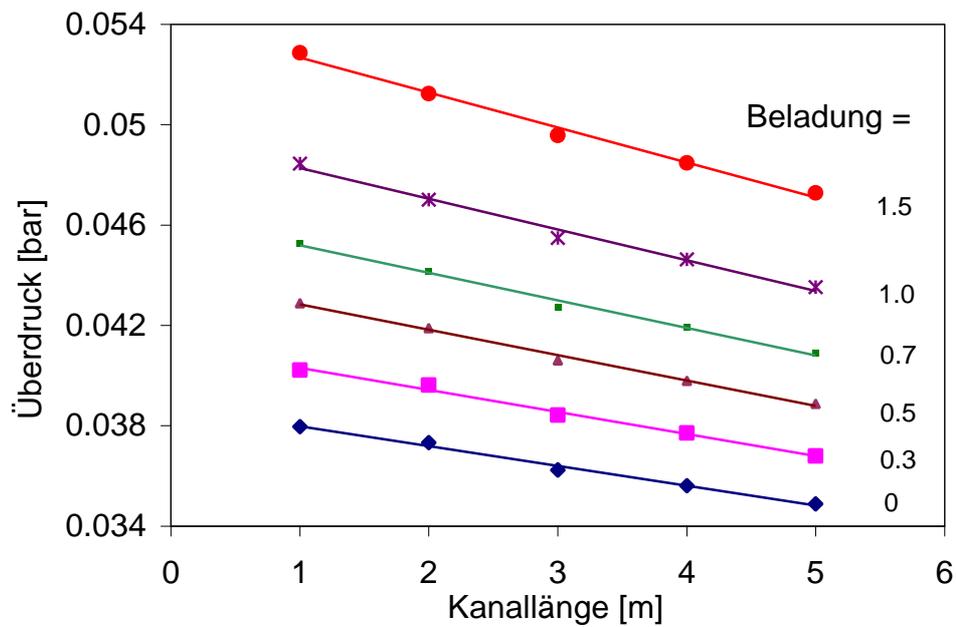


Abb.12) Überdruckverlauf in Abhängigkeit von der Kanallänge und der Beladung am Beispiel der Feststoffbeladung der Luft mit 195 µm großen Partikeln

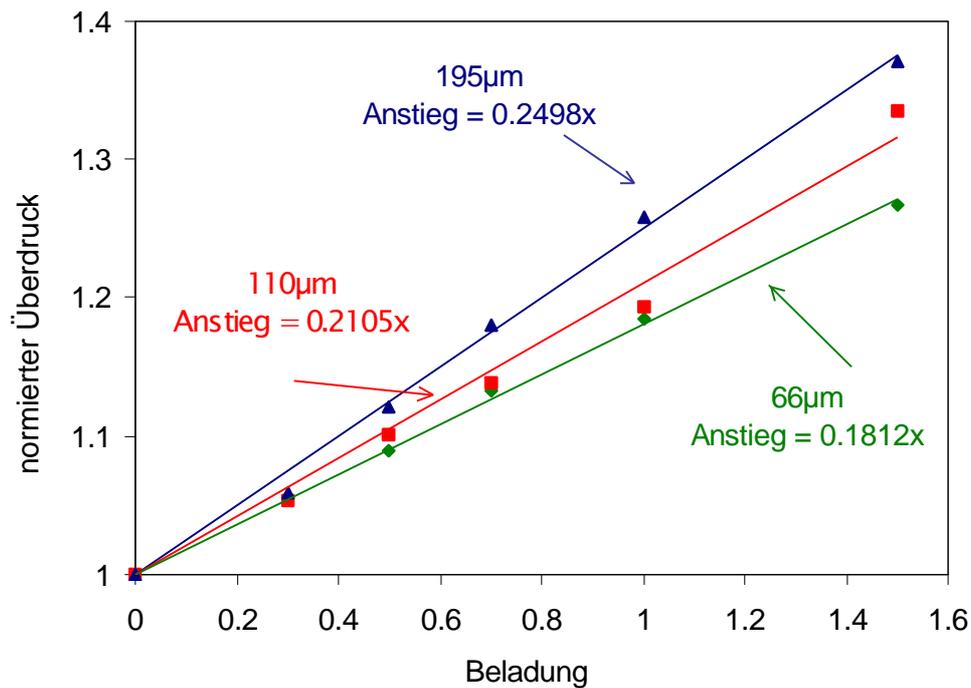


Abb.13) Abhängigkeit des normierten Überdrucks von der Feststoffbeladung der Luft für verschieden große Partikel

4 Messungen mit der Particle Image Velocimetry (PIV) zur Untersuchung der Turbulenzstruktur in einer partikelbeladenen Kanalströmung

Mit Hilfe der PIV können Turbulenzstrukturen und deren Änderungen visuell dargestellt und weiter analysiert werden. Unter Verwendung einer hochauflösenden CCD-Kamera (1280*1024) sind erste Messungen in der partikelbeladenen Kanalströmung durchgeführt worden. Für die Validierung der PIV-Ergebnisse werden Messungen verwendet, die mit Hilfe der PDA gewonnen wurden. Bei einem Vergleich der beiden Meßmethoden PIV und PDA ist eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse sichtbar (Abb. 14).

Bei den folgenden PIV-Messungen kommen unterschiedliche Partikelgrößen zum Einsatz. Dabei wird auch die Feststoffbeladung der Luft verändert, um den Einfluß der Partikelkollisionen auf die Turbulenzmodifikation der Luft zu untersuchen. Im folgenden werden erste Ergebnisse zur Turbulenzstruktur in Abhängigkeit der Feststoffbeladung exemplarisch für die 625 µm Partikel dargestellt.

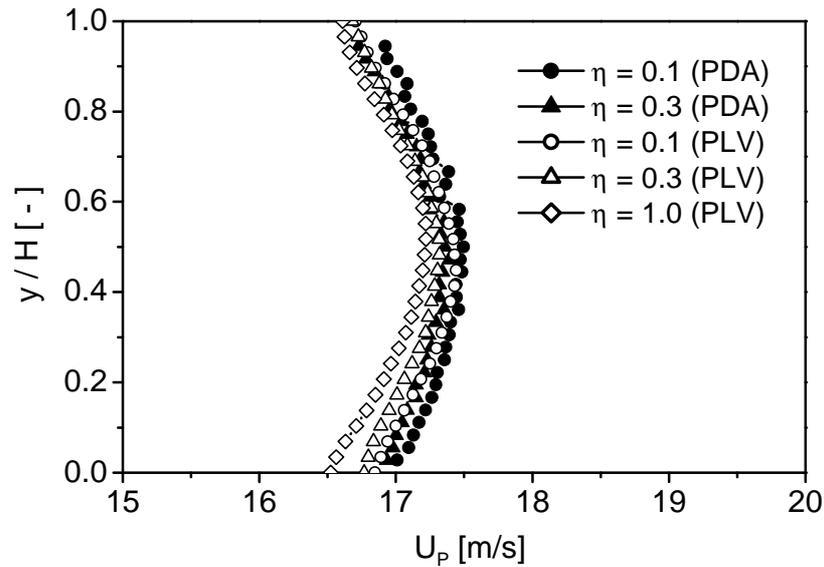
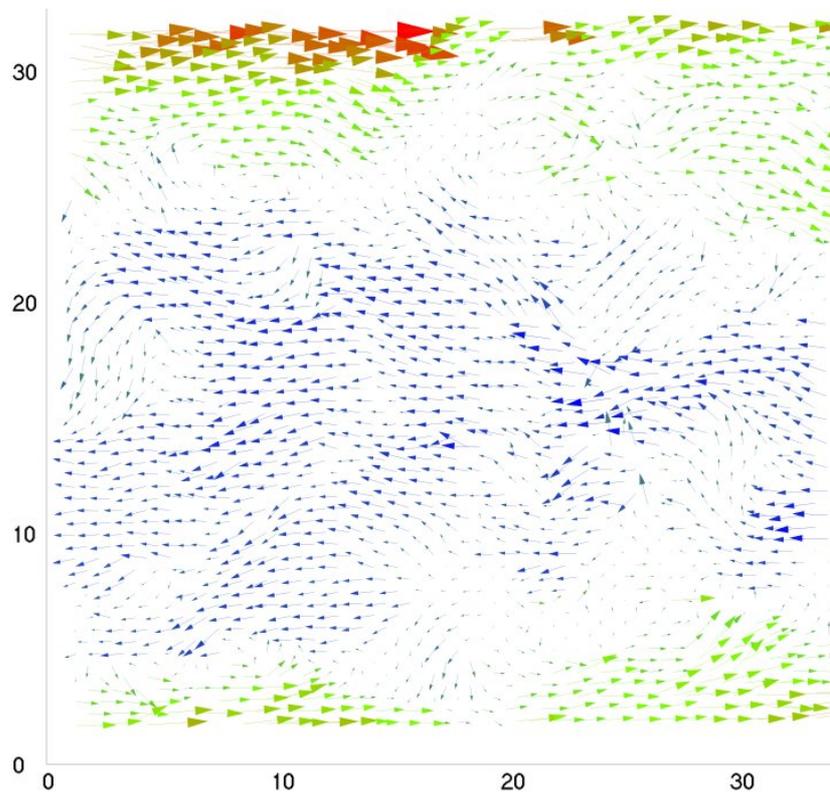


Abb.14) Vergleich der beiden Meßverfahren PIV und PDA anhand der Partikelgeschwindigkeit von 195 μm großen sphärischen Glaspartikeln bei einer mittleren Gasgeschwindigkeit von 19,7 m/s, für unterschiedliche Beladungen

In Abb. 15 ist ein vertikaler Schnitt der partikelbeladenen Strömung ($D_p = 625 \mu\text{m}$) gezeigt. Durch die Subtraktion der lokalen mittleren Luftgeschwindigkeit kann die momentane Schwankungsgeschwindigkeit und damit die Turbulenzstruktur sichtbar gemacht werden. Das Auftreten größerer Wirbelstrukturen (3-5 mm) ist in Abb. 15 deutlich sichtbar. Im Kanalzentrum, wo die Schwankungsgeschwindigkeit am geringsten und die Luftgeschwindigkeit am höchsten ist, treten weniger große Wirbelstrukturen auf, da der Wandeinfluß hier geringer ist. Bei einer sehr geringen Beladung wird deutlich erkennbar, daß die Turbulenzstrukturen in Wandnähe ausgeprägter sind. Erhöht sich die Beladung, wird die Turbulenzstruktur qualitativ modifiziert, und die Wirbel werden besonders in Wandnähe abgeschwächt. Obwohl detaillierte Untersuchungen der Struktur in partikelbeladenen Strömungen nicht Gegenstand des Forschungsvorhaben waren, werden diese Messungen weiterhin durchgeführt, da hierdurch ein wesentlicher Beitrag zur Bestimmung der Turbulenzmodifikation durch Partikel geleistet werden kann.

a)



b)

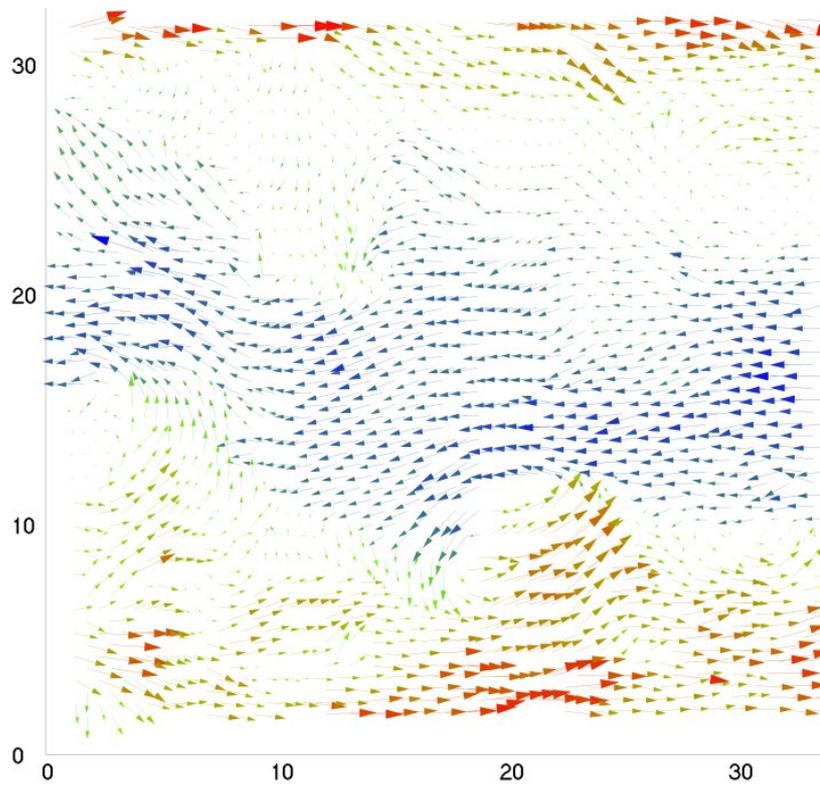


Abb.15) Vertikaler Schnitt der Geschwindigkeitsverteilung der Luftströmung bei einer Beladung mit $625 \mu\text{m}$ Partikeln, a) Beladung = 0,05 und b) Beladung = 1,25 ($U_{\text{mittel}} = 19,8 \text{ m/s}$)

5 Numerische Berechnungen und Validierung

Im Rahmen des Vorhabens wurden die in der ersten Projektphase entwickelten Modelle für Partikel/Wand-Kollisionen und Partikelstöße weiterentwickelt und in vorhandene zweidimensionale Berechnungsprogramme implementiert und getestet. Die Berechnung der partikelbeladenen Gasströmung erfolgte mit dem Euler/Lagrange-Verfahren. Die Grundlagen der Berechnungen und die berücksichtigten Kräfte bei der Partikelbewegung sind in Sommerfeld (2001) und Lain et al. (2002) dargestellt. Bei den Berechnungen (Lain et al. 2002) wurde die Rückwirkung der Partikel auf die Gasphase berücksichtigt. Um sowohl eine Turbulenzdämpfung als auch -anfächung zu berücksichtigen, wurden verschiedene Modellansätze in der Erhaltungsgleichung für die turbulente kinetische Energie verwendet.

Zunächst wurden numerische Berechnungen ohne Kopplung durchgeführt, um die Effekte von Wandrauigkeit und Partikelstößen in dem Kanal mit einer Höhe von 35 mm zu analysieren. In Abb. 16 sind die Bahnen von 110 μm Partikeln für verschiedene Randbedingungen gezeigt. Ohne Wandrauigkeit kommt es sehr schnell zum schwerkraftbedingten Absinken der Partikel, und sie springen entlang des Kanalbodens. Unter Berücksichtigung der Wandrauigkeit springen die Partikel von Wand zu Wand und sind damit fast gleichmäßig über den Kanal verteilt. Eine weitere Vergleichmäßigung der Feststoffkonzentration ergibt sich bei der Berücksichtigung der Partikelstöße.

Diese Effekte sind selbstverständlich auch von der Partikelgröße abhängig (Abb. 15 und 16). Wird keine Wandrauigkeit berücksichtigt, sammeln sich die Partikel ohne Kollisionen in Bodennähe des Kanals an (Abb. 17). Mit steigender Feststoffbeladung erhöht sich die Kollisionsfrequenz und führt zu einer gleichmäßigeren Verteilung des Feststoffs über der Kanalhöhe. Dieser Effekt ist besonders bei größeren und trägeren Partikeln ausgeprägt (z.B. 110 μm). Bei kleineren Partikeln (60 μm) ist die Dispersion durch Turbulenz noch nicht ausreichend, so daß trotz der Partikelstöße ein deutliches schwerkraftbedingtes Absinken zu beobachten ist. Allerdings reduziert sich die Feststoffkonzentration in Bodennähe infolge der Kollisionen kontinuierlich.

Die Berücksichtigung der Wandrauigkeit führt zu einer gleichmäßigeren Verteilung der Partikel im Kanal, was besonders bei den 100 μm Partikeln ausgeprägt ist (Abb. 18). Kollisionen zwischen den Partikeln haben nur einen relativ geringen Einfluß auf die Profile des Feststoffmassenstroms. Bei den kleineren Partikeln (60 μm) sind Kollisionen von größerer Bedeutung und führen bei hohen Beladungen zu einer Anhäufung in der Mitte des Kanals (Abb. 18).

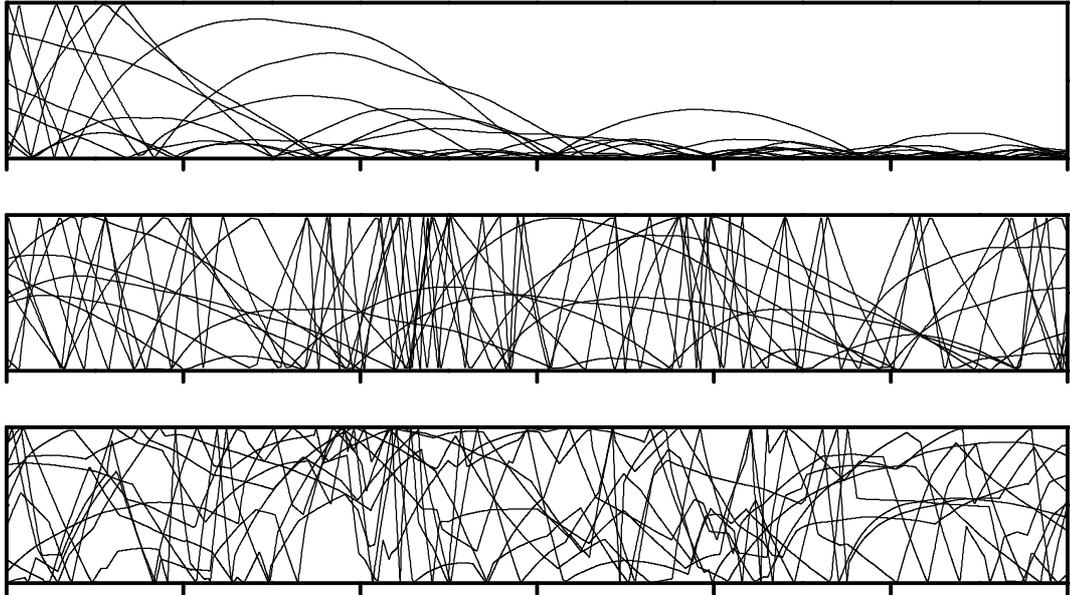


Abb. 16) Berechnete Partikelbahnen im horizontalen Kanal (Höhe 35 mm, Länge 6 m) für 110 μm Partikel, a) ohne Rauigkeit und Partikelstöße, b) mit Rauigkeit und ohne Partikelstöße, c) mit Rauigkeit und Partikelstößen ($U_{\text{mittel}} = 18 \text{ m/s}$, $\eta = 0,1$)

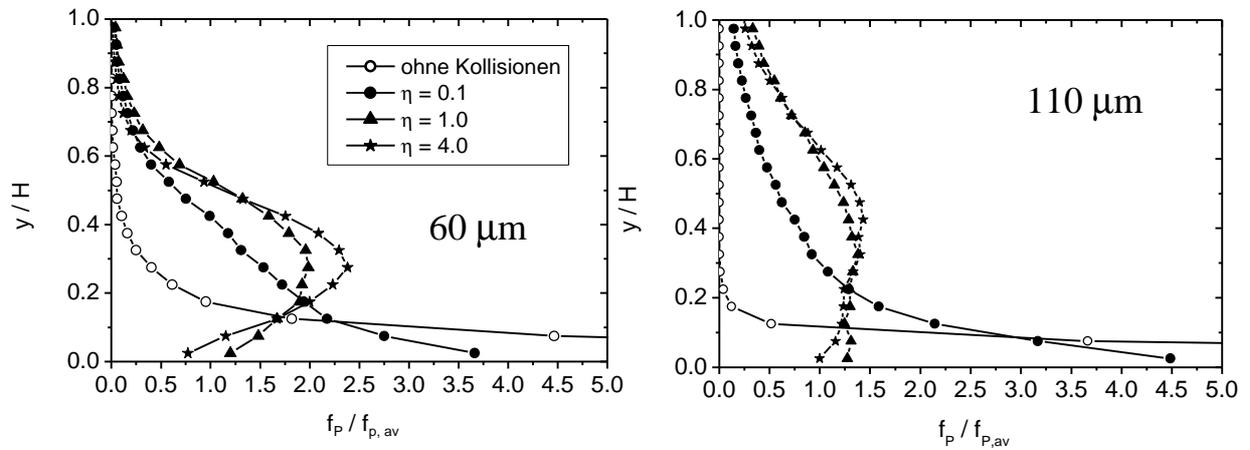


Abb. 17) Berechnete Profile des Partikelmassenstroms ohne Wandrauigkeit, a) $D_p = 60 \mu\text{m}$, b) $D_p = 110 \mu\text{m}$ ($U_{\text{mittel}} = 18 \text{ m/s}$)

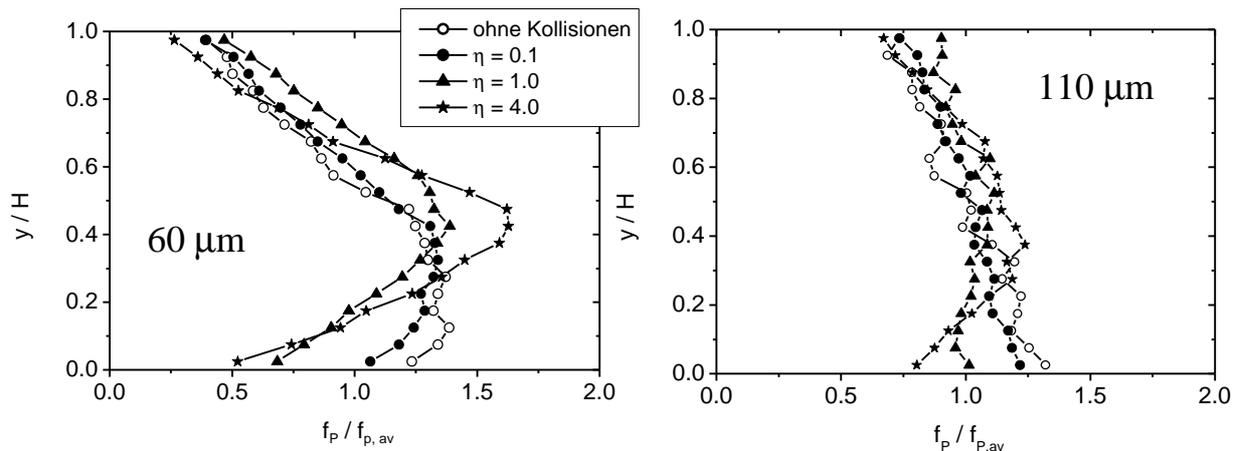


Abb. 18) Berechnete Profile des Partikelmassenstroms mit Wandrauhigkeit, a) $D_p = 60 \mu\text{m}$, b) $D_p = 110 \mu\text{m}$ ($U_{\text{mittel}} = 18 \text{ m/s}$)

Werden die Berechnungen ohne Kopplung für die $100 \mu\text{m}$ Partikel mit den Messungen verglichen, zeigt sich deutlich der Einfluß von Wandrauhigkeit und Partikelkollisionen (Abb. 19). Die Profile der Feststoffkonzentration zeigen ein ausgeprägtes, schwerkraftbedingtes Absinken, wenn Partikelkollisionen und/oder Wandrauhigkeit vernachlässigt werden. Unter Berücksichtigung beider Effekte ergibt sich eine fast gleichmäßige Verteilung des Feststoffs über der Kanalhöhe und die Übereinstimmung mit den Messungen ist sehr gut.

Die Erhöhung der Wandkollisionsfrequenz sowohl durch Partikelstöße als auch durch die Wandrauhigkeit hat ebenfalls einen erheblichen Einfluß auf die horizontale Komponente der Partikelgeschwindigkeit, da hierdurch der Impulsverlust steigt (Abb. 19b). Werden beide Effekte berücksichtigt, stimmt die Form des berechneten Profils sehr gut mit den Messungen überein. Allerdings liegen die berechneten Werte etwas unterhalb der Meßwerte (Differenz ca. 5 %). Die Komponenten der Schwankungsgeschwindigkeiten der Partikelphase werden deutlich zu niedrig berechnet, wenn die Wandrauhigkeit vernachlässigt wird (Abb. 19c und d). Stöße zwischen den Partikeln haben einen etwas geringeren Einfluß. Es wird aber deutlich, daß hierdurch die Schwankungsbewegung der Partikel isotroper wird.

Auch für den Fall größerer Partikel bei einer geringen Rauigkeitstiefe von ca. $3,5 \mu\text{m}$ ergab sich für die Rechnungen ohne Kopplung eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit den gemessenen Partikeleigenschaften (Abb. 20). In diesem Fall ist die Bewegung dominiert durch Wandkollisionen, und Partikelstöße haben eine untergeordnete Bedeutung.

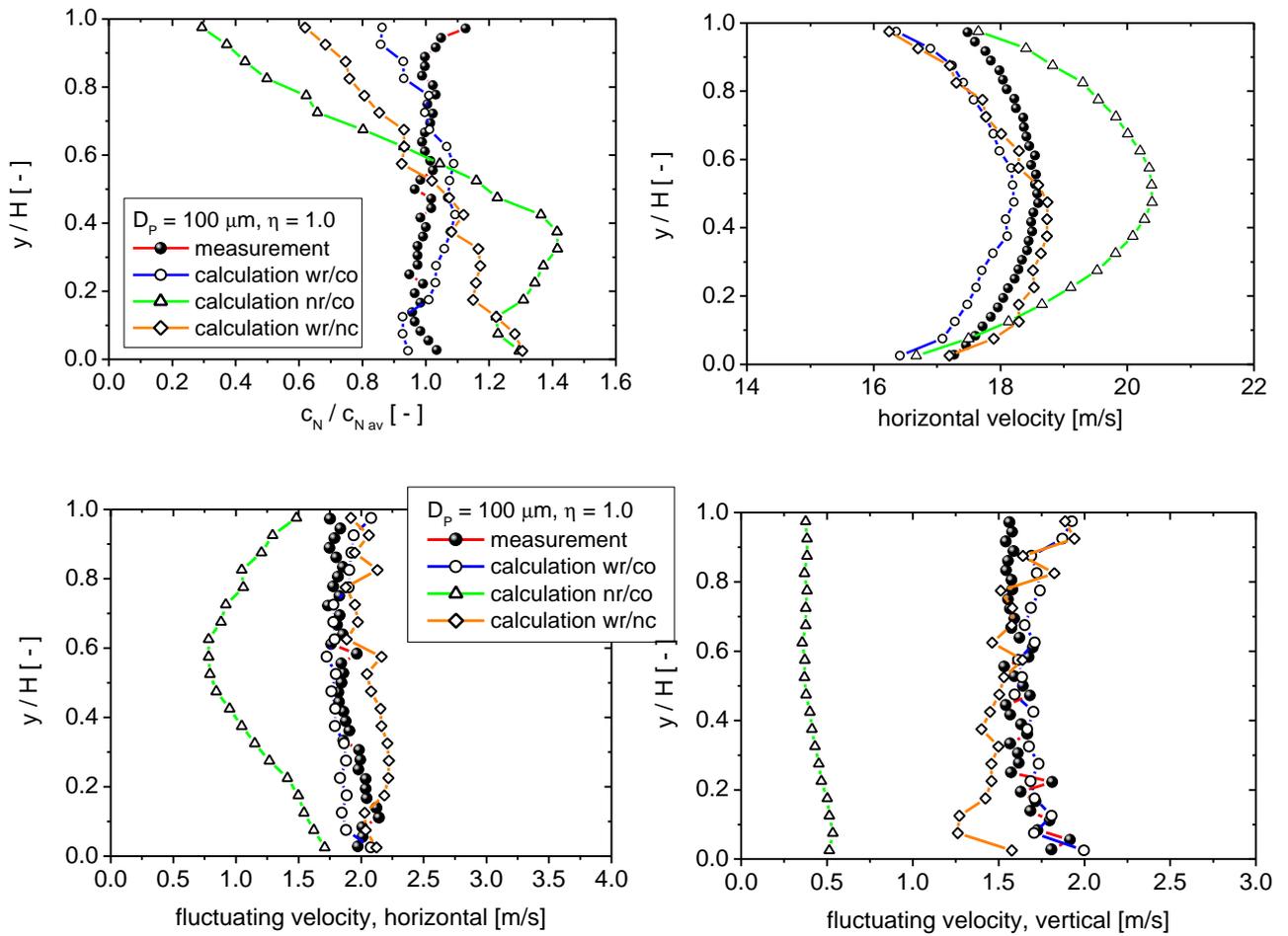


Abb. 19) Vergleich von Messung und Rechnung (ohne Kopplung) für verschiedene Modelle ($U_{\text{mittel}} = 19,7 \text{ m/s}$, $D_p = 100 \mu\text{m}$, $\eta = 1,0$, hohe Rauigkeit, nr: keine Rauigkeit, wr: Rauigkeit, nc: keine Kollisionen, co: Kollisionen)

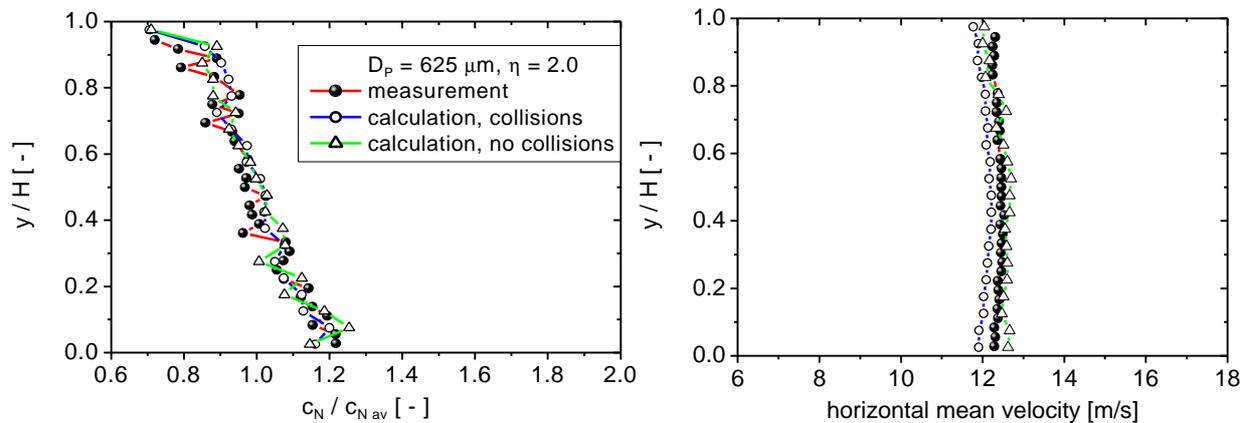


Abb. 20) Vergleich von Messung und Rechnung (ohne Kopplung) für verschiedene Modelle ($U_{\text{mittel}} = 19,7 \text{ m/s}$, $D_p = 625 \mu\text{m}$, $\eta = 2,0$, geringe Rauigkeit)

Numerische Berechnungen unter Berücksichtigung der Kopplung, also der Rückwirkung der Partikel auf die Gasphase, wurden in der Arbeit von Lain et al. (2002) vorgestellt. Generell konnte durch die Verwendung eines Reynolds-Spannungs-Turbulenzmodells eine relativ gute Übereinstimmung von Messung und Rechnung für die horizontalen mittleren Geschwindigkeiten und die Schwankungskomponenten erreicht werden. Allerdings waren die gemessenen Profile der vertikalen Schwankungsgeschwindigkeit deutlich flacher als bei den Rechnungen. Der Einfluß der Kopplung auf die berechneten Profile der Gasgeschwindigkeiten fällt für die Horizontalkomponente deutlich geringer aus als bei den Messungen (Abb. 21). Bei der vertikalen Komponente der Schwankungsgeschwindigkeit ist das Gegenteil festzustellen, und die Messungen zeigen eine geringere Dämpfung.

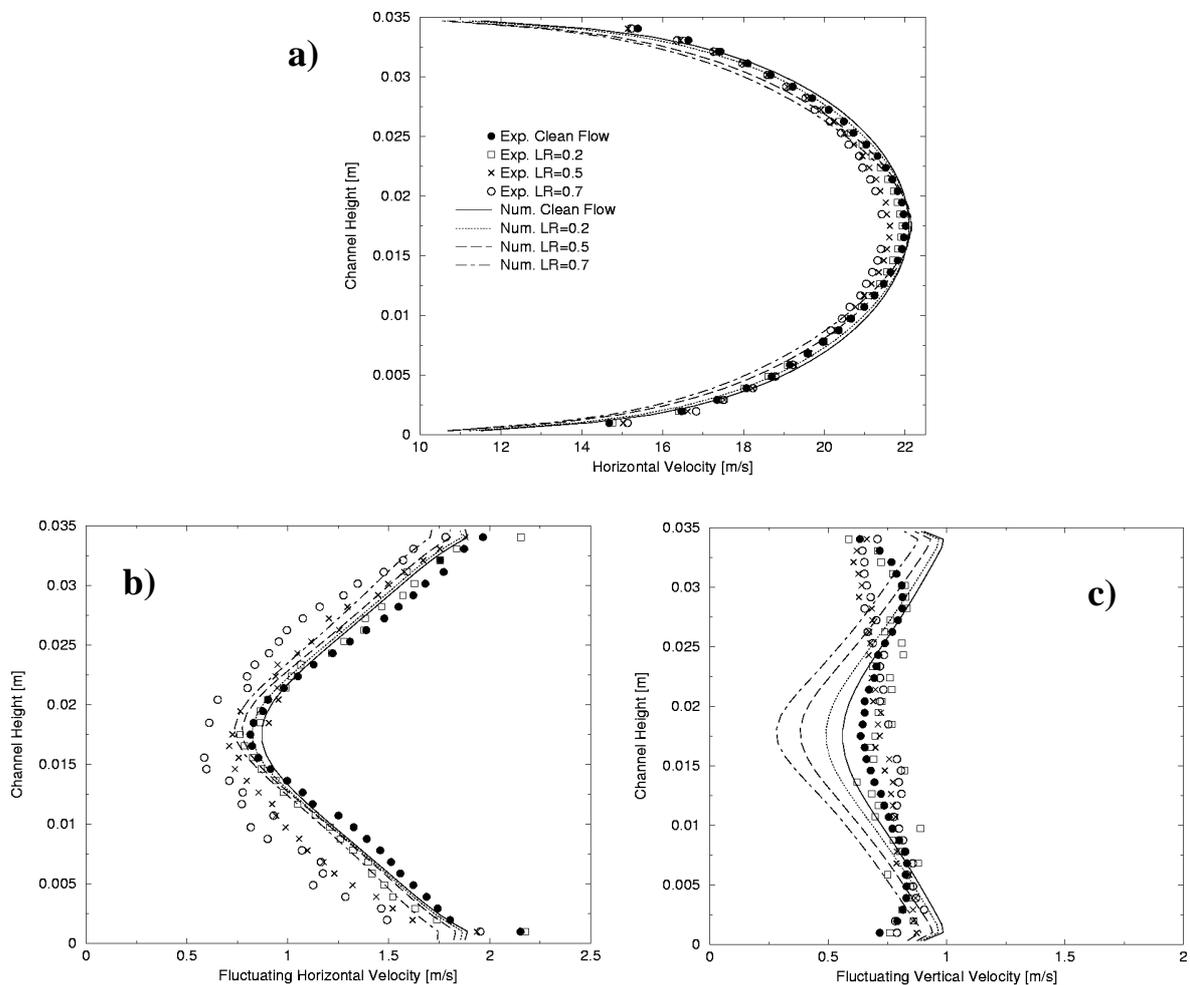


Abb. 21) Einfluß der Kopplung auf die berechneten Profile der Gasgeschwindigkeiten, Vergleich mit Messungen ($U_{\text{mittel}} = 19,7 \text{ m/s}$, $D_p = 100 \text{ }\mu\text{m}$, hohe Rauigkeit), a) horizontale mittlere Geschwindigkeit, b) horizontale Schwankungsgeschwindigkeit, c) vertikale Schwankungsgeschwindigkeit

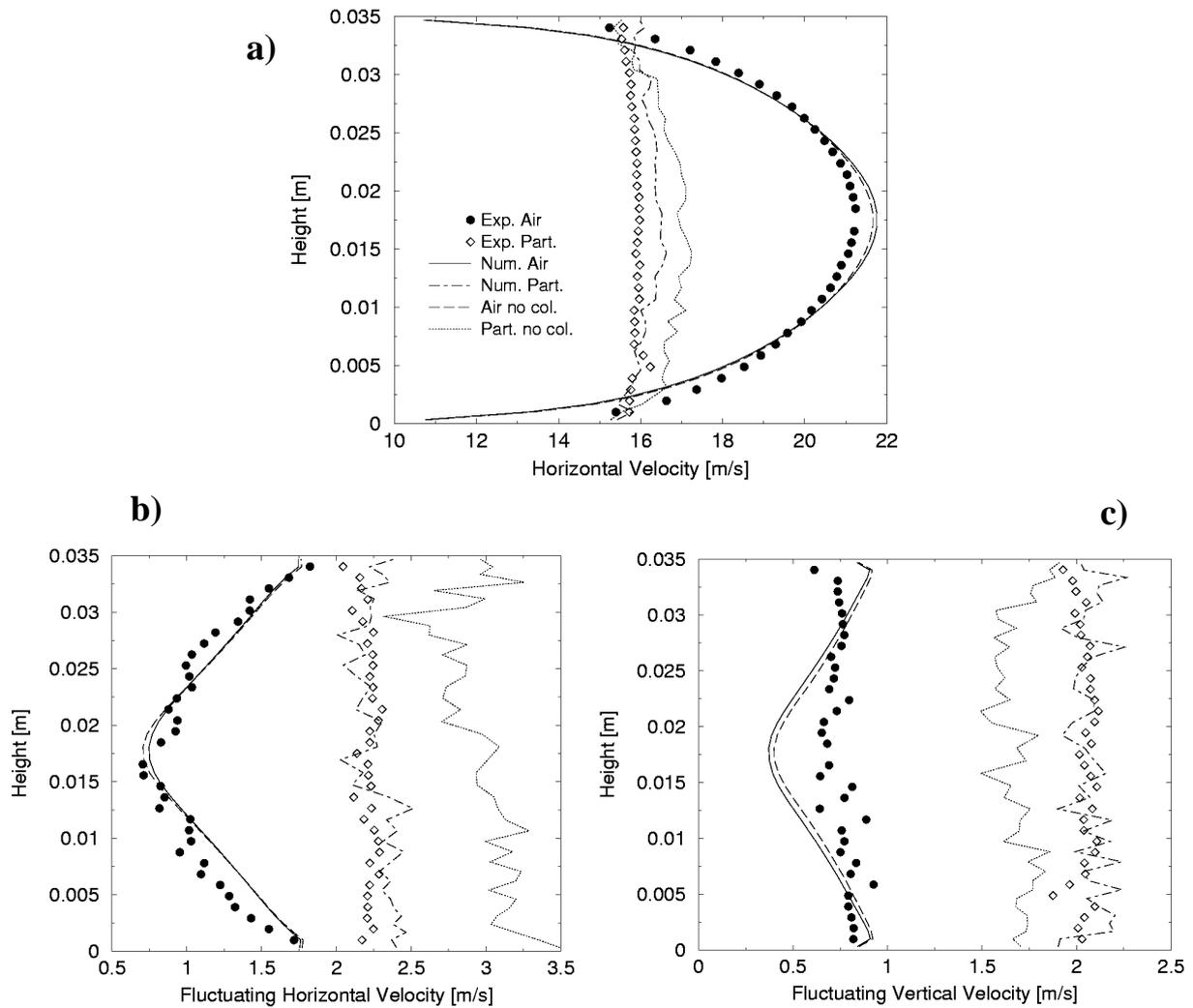


Abb. 22) Vergleich von Messungen und Rechnung ohne und mit Partikelstößen ($U_{\text{mittel}} = 19,7 \text{ m/s}$, $D_p = 195 \text{ }\mu\text{m}$, hohe Rauigkeit), a) horizontale mittlere Geschwindigkeit, b) horizontale Schwankungsgeschwindigkeit, c) vertikale Schwankungsgeschwindigkeit

Schließlich ist in Abb. 22 noch der Einfluß der Partikelkollisionen auf Partikel- und Luftgeschwindigkeiten für $195 \text{ }\mu\text{m}$ Partikel dargestellt. Nur wenn dieser Effekt berücksichtigt wird können die Partikelgeschwindigkeiten richtig wiedergegeben werden. Insbesondere zeigt sich auch, daß die Schwankungsbewegung der Partikel durch Stöße isotroper wird. Die mittlere Gasgeschwindigkeit und die Schwankungskomponenten werden nur sehr geringfügig durch die Partikelstöße beeinflusst (4-Wege-Kopplung).

Zur Berücksichtigung der Turbulenzanfachung bei größeren Partikeln infolge der Nachlaufablösung wurden eine Reihe von unterschiedlichen Modellen implementiert und getestet. Mit diesen Modellen war es allerdings nicht möglich, im Zusammenhang mit einem Reynoldsspannungs-Turbulenzmodell die experimentell beobachteten Trends nachzuvollziehen. Es ergaben sich deutlich überhöhte Schwankungsgeschwindigkeiten für die Gasphase bei beiden

Komponenten. Daher werden in diesem Zusammenhang derzeit weitergehende Untersuchungen durchgeführt.

6 Schlußfolgerung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens konnten wesentliche international anerkannte Beiträge zum Partikeltransport in einer horizontalen Kanalströmung geleistet werden. Bei den Untersuchungen standen sowohl die Effekte der Wandkollision und Stöße zwischen Partikeln als auch die Turbulenzbeeinflussung im Vordergrund. Erstmals wurde dabei auch der Einfluß der Wandrauigkeit berücksichtigt. Es konnte gezeigt werden, daß der Anstieg der Wandrauigkeit eine Erhöhung der Partikel/Wand-Kollisionsfrequenz zur Folge hat, was wiederum zu einem Anstieg der Energie der Partikelschwankungsbewegung führt. Weiterhin wurde nachgewiesen, daß die Wandrauigkeit einen Einfluß auf Strömung und Turbulenz hat. Für kleine Partikel ergab sich eine Erhöhung der Turbulenzdämpfung mit steigender Rauigkeit. Die experimentellen Ergebnisse verdeutlichten weiterhin, daß der Konzentrationsverlauf der Partikel entscheidend von Kollisionen zwischen Partikeln beeinflußt wird, die zur Redispersierung der Partikel im Kanal führen.

Die Turbulenzmodifikation der Gasströmung durch die Anwesenheit von Partikeln konnte experimentell nachgewiesen werden. Mit Hilfe von Energiespektren wurden detaillierte Erkenntnisse über die Dämpfung bzw. Anfachung von Turbulenz gewonnen.

Die Messungen des statischen Drucks in Abhängigkeit von der Partikelgröße und der Beladung zeigen, daß ein linearer Zusammenhang zwischen Partikelkollisionen und dem statischen Druck existiert. Der Einfluß der Wandrauigkeit auf den statischen Druck wird im weiteren Verlauf der experimentellen Arbeiten untersucht.

Die numerischen Berechnungen unter Berücksichtigung von Wandkollisionen und Partikelstößen ergaben für verschiedene Fälle bei kleinen Partikeln eine gute Übereinstimmung mit den Messungen. Beide Effekte sind von entscheidender Bedeutung für die Berechnung von partikelbeladenen Rohr- und Kanalströmungen. Die Turbulenzdämpfung bei kleinen Partikeln konnte mit den Standardtermen in den Erhaltungsgleichungen für die Turbulenzgrößen beschrieben werden. Eine Turbulenzproduktion bei großen Partikeln konnte allerdings mit den verschiedenen eingesetzten Nachlaufmodellen bisher nicht korrekt berechnet werden. Hierzu werden weitergehende Untersuchungen durchgeführt. Ebenso sollen noch Berechnungen des Druckverlustes bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen mit den Messungen verglichen werden.

Durch das Forschungsvorhaben konnten bedeutende Beiträge zum Verständnis von Partikel/Wand-Kollisionen unter Berücksichtigung der Wandrauigkeit, Partikelstöße und Turbulenzbeeinflussung durch Partikel geleistet werden. Die experimentellen Daten werden künftig für die Validierung von numerischen Berechnungen zur Verfügung stehen.

Symbolliste

U – [m/s]	horizontale Geschwindigkeit
U_{mittel} – [m/s]	über die Kanalhöhe gemittelte, horizontale Luftgeschwindigkeit
V – [m/s]	vertikale Geschwindigkeit
E_p – [-]	Mittlere Energie der Partikelschwankungsgeschwindigkeit
H – [m]	Kanalhöhe
y – [m]	Wandabstand
Re – [-]	Reynoldszahl
D – [m]	Durchmesser
η – [-]	Feststoffbeladung der Luft

Indizes

rms – [m/s]	Schwankungsgeschwindigkeit
p – [-]	Feststoffphase

Literatur

Gore R.A.; Crowe C.T.: Effect of particle size on modulating turbulent intensity. Int. J. Multiphase Flow 15: 279-285 (1989)

Nobach H; Müller E; Tropea C.: Efficient estimation of power spectral density from LDA data. Exp. in Fluids 24: 499-509 (1998)

Sommerfeld, M.: Theoretical and experimental modelling of particulate flow: Overview and fundamentals. Von Karman Institute for Fluid Mechanics, Rhode Saint Genèse, Belgium, Lecture Series No. 2000-6, 1-62 (2000)

Eigene Veröffentlichungen und Vorträge

Sommerfeld, M. and Huber, N.: Experimental analysis and modelling of particle-wall collisions. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 25, 1457-1489 (1999)

Sommerfeld, M.: Validation of a Lagrangian modelling approach for inter-particle collisions in homogeneous isotropic turbulence. *International Journal of Multiphase Flows*, Vol. 27, 1828-1858 (2001)

Lain, S.; Sommerfeld, M. and Kussin, J.: Experimental studies and modelling of four-way coupling in particle-laden horizontal channel flow. In Print: *Int. Journal of Heat and Fluid Flow* (2002)

Kussin, J. and Sommerfeld, M.: Experimental studies on particle behaviour and turbulence modification in horizontal channel flow with different wall roughness. In Print: *Experiments in Fluids* (2002)

Sommerfeld, M.: Analysis of transport effects of turbulent gas-particle flow in a horizontal channel: Part I. Integral properties and validation. Submitted to *Powder Technology*, Jan. 2002

Kussin, J, Sommerfeld M.: Analysis of transport effects of turbulent gas-particle flow in a horizontal channel: Part II. Integral properties and validation. Submitted to *Powder Technology*, Jan. 2002

Sommerfeld, M.; Kussin, J. und Kohnen, G.: Transporteffekte in partikelbeladenen Kanalströmungen. DFG Zwischenbericht, Forschungsvorhaben SO 204/12-1 (1999)

Kussin, J.; Sommerfeld, M.: Investigation of particle behaviour and turbulence modification in particle-laden channel flow. *Proceedings PARTEC 2001*, Session 12, Paper No. 046 (2001)

Sommerfeld, M.; Bröder, D. and Kussin, J. (keynote lecture): Recent developments and applications of non-intrusive optical techniques for the analysis of dispersed multiphase flow. *Proceedings 4th International Conference on Multiphase Flow*, New Orleans, ICMF (2001)

Sommerfeld, M.; Lain, S.; Kussin, J.: Analysis of transport effects of turbulent gas-particle flow in a horizontal channel. *4th International Conference on Multiphase Flow*, New Orleans, ICMF (2001)

Lain, S.; Kussin, J.; Sommerfeld, M.: Experimental studies and modelling of four-way coupling in particle laden horizontal channel flow. *Proceedings 2nd Int. Symp. Turbulence and Shear Flow Phenomena*. Stockholm, June (2001)

Kussin, J.; Sommerfeld, M.: Untersuchung der Turbulenzbeeinflussung in partikelbeladenen Kanalströmungen. GVC- Fachausschuss Bamberg, Paper No 1.14 (2000)

Kussin, J.; Bröder D.; Sommerfeld, M.: Investigation of particle behaviour and turbulence modification in particle-laden channel flow with pulse-light velocimetry. 4th International Symposium on Particle Image Velocimetry, Göttingen, Abstract No 1110 (2001)

Kussin, J., Sommerfeld, M: Untersuchung der Turbulenzstruktur in partikelbeladenen Kanalströmungen mittels Phasen-Doppler-Anemometrie und Particle-Image-Velocimetry. GVC-Fachausschuss Magdeburg, Session 3.15 (2002)