Diss. ETH ex. B

Diss. ETH Nr. 11344

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ZUR STRÖMUNGSMECHANIK IN EINER HOCHEXPANDIERTEN ZIRKULIERENDEN GAS/FESTSTOFF-WIRBELSCHICHT

ABHANDLUNG

Zur Erlangung des Titels
DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

RAINER NICOLAI

Dipl.-Ing. (RWTH Aachen)
geboren am 18. August 1965
von Leverkusen (D)

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. L. Reh, Referent
Prof. Dr. G. Yadigaroglu, Korreferent

Zürich 1995

Zusammenfassung

Zirkulierende Wirbelschicht (ZWS) Reaktoren finden aufgrund ihrer systeminhärenten Vorteile bei Reaktionen im Bereich der Gas/Feststoff-Verfahrenstechnik, bei denen maximale Relativgeschwindigkeiten zwischen beiden Phasen wünschenswert sind, wachsende Verbreitung. Zahlreiche industrielle Prozesse werden derzeit im Pilot- oder Demonstrationsmaßstab betrieben und eine Vielzahl weiterer zukünftiger Anwendungen von ZWS-Reaktoren zeichnen sich ab. Da eine mathematische Vorausberechnung der sehr komplexen Zwei-Phasen-Strömungsdynamik auf absehbare Zeit nicht in Sicht ist, wird für eine verläßliche Auslegung von ZWS-Reaktoren eine auf experimentellen Ergebnissen basierende Kenntnis globaler und auch lokaler Strömungsdynamik des Gas/Feststoff-Systems über den gesamten Betriebsbereich von zirkulierenden Wirbelschichten unbedingt erforderlich.

In der vorliegenden, mehrheitlich experimentellen Arbeit wurden an einer kalt betriebenen halbtechnischen ZWS-Anlage (Steigrohrdurchmesser = 0.411 m; Steigrohrhöhe = 8.5 m) umfangreiche systematische Messungen durchgeführt. Für drei unterschiedliche, annähernd monodisperse Schüttgüter (Glaskugeln), charakterisiert durch *Archimedes*-Zahlen von 6, 18 und 100, wurden axiale und radiale Feststoffverteilungen sowie axiale Feststoffgeschwindigkeiten und Feststoffimpulsstromdichten ermittelt. Schon eine relativ geringe Variation der das Gas/Feststoff-System charakterisierenden *Archimedes*-Zahl (Partikelgröße) zeigte erhebliche Einflüsse auf Feststoffverteilung und Feststoffbewegung im gesamten ZWS-System.

Die bei den lokalen Messungen angewendete Sonden-Meßtechnik wurde teilweise aufbauend auf Vorarbeiten vollständig neu entwickelt. Ein laseroptisches Meßsystem diente dazu simultan lokale Feststoffgeschwindigkeiten und Feststoffkonzentrationen mit hoher zeitlicher Auflösung zu bestimmen. Mit einem zweiten, unabhängigen Meßsystem auf piezo-resistiver Basis wurden lokale Feststoffimpulsstromdichten gemessen.

Die Ergebnisse beider Meßsysteme wurden herangezogen um die Massenströme der internen, axialen Rezirkulation des Feststoffes im Steigrohr der ZWS-Anlage mit dem extern, über Zyklonabscheider und Siphon umlaufenden Feststoffmassenstrom vergleichen zu können. Es zeigt sich, daß der im Steigrohr axial rückströmende Feststoffmassenstrom für den untersuchten weiten Betriebsbereich der ZWS-Anlage praktisch unabhängig von eingestellten Fluidisationsgeschwindigkeiten und vorgegeben Bettinventaren ist.

Im Hinblick auf die Erfassung lokaler Relativgeschwindigkeiten zwischen Gas und Feststoff im Steigrohr der ZWS-Anlage wurde ein neuartiges System zur Messung von lokalen Gasgeschwindigkeiten mittels Laufzeitmessungen von

Tracergaspulsen entwickelt, welches sich auch für den Einsatz bei den maximal in einer Wirbelschicht auftretenden Feststoffkonzentrationen eignet. Dieses System könnte in Verbindung mit der ebenfalls in dieser Arbeit angewendeten optischen Erfassung der Feststoffgeschwindigkeit zukünftig dazu eingesetzt werden, direkt lokale Relativgeschwindigkeiten mit hoher zeitlicher Auflösung zu erfassen.

Bei der theoretischen Beschreibung der Strömungsvorgänge wurde die dimensionslose Darstellung der bei Wirbelschichtsystemen auftretenden Fluidisationszustände aufgegriffen. Beide Zustände der Gas/Feststoff-Wirbelschicht, die ideale homogene Ausdehnung sowie der reale, entmischte Zustand können in einem dimensionslosen Ar-Ω Wirbelschichtdiagramm dargestellt werden, welches für Apparateauslegungen hilfreiche Abschätzungen des Wirbelschicht-Fluidisationszustandes für unterschiedlichste Betriebs- und Stoffparameter ermöglicht.

Summary

Circulating fluidized bed (CFB) reactors have found a wide range of applications in gas-solid reaction processing especially where the maximum of relative velocity between both phases is of great advantage. Several industrial processes are currently operating and more future applications are predictable. As a pure mathematical description of the very complex gas-solid two-phase flow is not available, it is essential for a reliable reactor design to base on experimental confirmed knowledge not only of the global but also of the local gas-solid flow behaviour valid for the whole operating range of circulating fluidized beds.

In this mainly experimentally orientated investigation, extensive systematic measurements have been conducted in a cold model CFB of semi-industrial size (riser diameter 0.411 m, total height 8.5 m). For three different, almost monodispersed solids fractions (glass beads), characterised by *Archimedes*-numbers of 6, 18 and 100, axial and radial profiles of solids distribution, solids velocity and solids momentum flux have been determined. Already a small variation of the *Archimedes*-number (particle size) shows a significant influence on solids distribution and solids movement in the whole CFB-system.

All local measurements have been performed by local probe systems which have been newly developed, partially based on preceding work. A laser-optical probe has been used to determine simultaneously local solids concentrations and solids velocities with high time resolution. Furthermore, a second, independent measurement system based on miniaturised piezo-resistive pressure transducers has been invented to characterise the local solids momentum flux.

Results of both measurement systems have been used to determine the mass flow ratio of CFB riser internal to external,via cyclone and siphon recycled solids. It became evident, that the riser internal axial recycled solids mass flow is almost independent of the investigated wide variations in fluidization conditions as well as bed inventories of the CFB-system.

With regard to the determination of local relative velocities between gas and solids in the CFB riser, a new measurement system to obtain local gas velocities by time delay measurements of tracer gas pulses has been developed. This system is also applicable for solids concentrations maximally occurring in CFB systems. Moreover, together with the optical probe to determine local solids velocities, it can provide an appropriate tool to measure local relative velocities between gas and solids with high time resolution.

The description of CFB fluid dynamics used here is based on a dimensionless Ar-Ω diagram which characterises all fluidization conditions occurring in CFB systems. Both conditions, the ideal homogeneous as well as the real, aggregative expansion of the fluidized bed can be compared using this dimensionless diagram. Therefore, it is an appropriate tool to estimate CFB's fluidization behaviour within a wide range of operating conditions.