

Mehrphasenströmungen

Interne Arbeitssitzung des Gemeinschaftsausschusses „Mehrphasenströmungen“ der Verfahrenstechnischen Gesellschaft (VTG) und der VDI-Fachgruppe Staubtechnik

Die Sitzung fand am 24. und 25. April 1969 in Bad Homburg v. d. H. statt und wurde vom Obmann des Ausschusses, Prof. Dr.-Ing. H. Brauer, Berlin, geleitet¹⁾.

Im folgenden werden die Kurzfassungen der 21 Vorträge und einige Diskussionsbeiträge, soweit sie von allgemeinem Interesse sind, wiedergegeben.

Verminderung der Agglomeration bei elektrostatisch aufgeladenen Kunststoffpulvern

Dipl.-Ing. M. Käppel, Chemische Werke Hüls AG, Marl

Es wurde über die Entwicklung einer Vorrichtung berichtet, mit welcher die bipolare elektrostatische Aufladung bei Kunststoffpulvern sich so weit beseitigen läßt, daß die Rieseleigenschaften nicht mehr beeinträchtigt werden. Die Entladungsapparatur besteht aus einem zylindrischen Metallrohr, in dessen Achse ein dünner Draht gespannt ist. Beim Anlegen einer Hochspannung zwischen Rohr und Draht entstehen in dem inhomogenen elektrischen Feld in der Nähe des Drahtes freie Elektronen und Ionen in hoher Konzentration. Die Partikeln durchrieseln das Rohr in freiem Fall, wobei durch die hohe Ladungsdichte der Luft der Ladungsausgleich zwischen dem bipolar aufgeladenen Kunststoffpulver beschleunigt wird und die Teilchen sich gleichsinnig aufladen. Die Höhe der angelegten Spannung wird durch die Überschlagespannung begrenzt.

Die Partikelgröße des Kunststoffpulvers lag im Bereich zwischen 70 und 300 μm . Der Grad der elektrostatischen Aufladung wurde indirekt durch die Rieselfähigkeit des Pulvers und durch die Schüttdichte mit Hilfe von Eichmessungen bestimmt. Die Aufladung selbst entstand beim pneumatischen Fördern, wo die Partikeln intensiven Stoß- und Reibungsbeanspruchungen ausgesetzt sind.

Bei der Verwendung von Gleichspannung wurde ein Haften des Pulvers an der Innenwand der Zylinderelektrode beobachtet. Bei Wechselfeldspannung trat diese Erscheinung nicht auf. Infolge des von der Drahtelektrode ausgehenden elektrischen Windes wird das Kunststoffpulver mit zunehmendem Fallweg aus der Rohrachse verdrängt, wobei sich die Entladungswirkung verringert. Aus diesem Grunde wurde das Entladungsgerät in drei hintereinandergeschaltete Stufen unterteilt, wobei das Pulver jeweils an den Übergängen wieder in der Rohrachse zusammengeführt wird. Die Länge der einzelnen Stufen betrug 0,6 bis 0,8 m. Bei sechs parallel geschalteten Entladungsrohren mit je drei Stufen konnte ein wegen elektrostatischer Aufladung äußerst schlecht rieselndes PVC-Pulver in der Menge von 20 t/h in ein gut rieselndes Produkt überführt werden.

Bei der Diskussion wurde darauf hingewiesen, daß die mittlere Partikelgröße des PVC-Pulvers 130 μm betrug. Es wurde bemerkt, daß sich die Rieselfähigkeit von Pulvern bereits merklich verbessern läßt, wenn Partikeln $< 10 \mu\text{m}$ durch einen Sichtvorgang entfernt werden. Als Hauptanwendungsgebiet der Entladungsvorrichtung kommen Abfüll- und Dosieranlagen infrage.

Zeiteffekte der Adhäsion immersierter Festkörper im Hinblick auf die Thixotropie

Dr. G. Walter, Battelle-Institut e. V., Frankfurt/M.

Bei der Adhäsion von Gold-Kugeln, $d_p = 3 \mu\text{m}$, an Polyester- und Cellulose-Oberflächen in Wasser oder wäßrigen Detergentien-Lösungen treten verschiedene zeitabhängige Effekte auf. Werden die Teilchen zuerst mit der Oberfläche in Berührung gebracht und dann in das Immersionsmittel eingetaucht (Primärsystem), so sind die Haftkräfte sehr viel größer, als wenn die Oberfläche mit den Gold-Teilchen im eingetauchten Zustand in Kontakt gebracht werden, (Sekundärsystem). Die Größe der Haftkraft wurde in einem rotierenden System aus der Zentrifugalbeschleunigung und der Masse der an der Kunststoffoberfläche haftenden Teilchen ermittelt. Nach der Herstellung des Sekundärsystems führen die Partikeln kurzzeitig Oszillationsbewegungen aus, ohne ihren Platz zu verlassen. Bei dem Sekundärsystem nimmt die mittlere Adhäsionskraft im Laufe von Tagen zu, ohne daß jedoch in der Versuchszeit der Wert des Primärsystems erreicht wurde.

Diese an Einzelteilchen beobachteten Zeiteffekte ähneln dem thixotropen Verhalten von Suspensionen: Die zum Verflüssigen eines lange gelagerten thixotropen Gels nötige Schubspannung ist entsprechend dem Primärsystem hoch, verglichen mit der auf die Schubgeschwindigkeit Null extrapolierten Schubspannung, die dem Sekundärsystem zugeordnet werden kann. Die zum Verflüssigen notwendige Schubspannung nimmt mit der Lagerzeit im Laufe von Tagen und Wochen zu.

Das thixotrope Verhalten von Suspensionen läßt sich auf die Adhäsionskräfte zwischen den suspendierten Partikeln zurückführen. In diesem Zusammenhang wurden verschiedene Modellvorstellungen für die Zeiteffekte bei der Adhäsion in Gegenwart von Flüssigkeiten diskutiert: Erhöhte Viskosität des Wassers in der Nähe von Oberflächen oder zusätzliche Abstoßung der Adhäsionspartner infolge des sog. Spaltdrucks.

Photometrische Untersuchungen zur Wirkung grenzflächenaktiver Stoffe als Dispergiermittel in Suspensionen

Dipl.-Ing. B. Koglin, Universität Karlsruhe (TU)

In einer Suspension nimmt der volumenbezogene Streuquerschnitt des Feststoffs infolge von Agglomeration bei Agglomeraten $> 1 \mu\text{m}$ ab. Auch im Bereich der Vielfachstreuung bei relativ hoher Feststoffkonzentration $c < 10^{-2}$ verringert sich die Transmission monoton mit dem bei besserer Dispergierung wachsenden Streuquerschnitt.

¹⁾ Bericht über die Arbeitssitzung 1968 s. diese Zeitschr. 40, 665/71 [1968].

Mit einem Photometer wurde bei ständig gerührter Kuvette an einer Zink-Suspension in Wasser die Abnahme der mittleren Agglomeratgröße mit wachsender Konzentration des Dispergiermittels Natriumpyrophosphat für verschiedene Feststoffkonzentrationen gemessen. Dabei ließen sich jeweils optimale Dispergiermittelkonzentrationen feststellen, oberhalb derer keine weitere Dispergierung mehr erfolgte. Diese optimalen Werte nehmen mit wachsender Feststoffkonzentration etwa logarithmisch zu.

Mit Hilfe der photometrischen Methode wurde der Dispergieffekt α an verschiedenen Feststoffsuspensionen in Benzol bei Zugabe von Ölsäure als Dispergiermittel gemessen. Dabei bedeutet α die auf den Endwert bezogene Streuquerschnittsvergrößerung. Diese zeigt eine mit der Dielektrizitätskonstante des Feststoffs zunehmende Tendenz, was einer Übertragung der Theorie der van der Waalschen Kräfte in den makroskopischen Bereich entspricht.

In der Diskussion wurde darauf hingewiesen, daß der zuletzt genannte Zusammenhang nur bei Vermeidung der Agglomeration, also bei relativ großen Partikelabständen zutrifft. Der jeweilige Transmissionsendwert stellt sich bei tropfenweiser Zugabe des Dispergiermittels um so schneller ein, je größer die Rührgeschwindigkeit in der Kuvette ist.

Bewegungsvorgänge in Partikelschwärmen

*Priv.-Doz. Dr.-Ing. P. M. Weinspach,
Technische Hochschule München*

Bei den Bewegungsvorgängen in Partikelschwärmen lassen sich drei Fälle unterscheiden:

- 1.) Schwärme mit relativ stabiler Konfiguration der Teilchen, die nur bei geringer Feststoffkonzentration beobachtet werden.
- 2.) Schwärme mit beliebiger Konzentration in begrenzter Umgebung, z. B. in einem Sedimentationsgefäß, mit annähernd stationärem Verhalten.
- 3.) Schwärme mit beliebiger Konzentration in nicht begrenzter Umgebung, wofür häufig auch die Bezeichnung Flugwolke gewählt wird.

Quantitativ am weitesten erfaßt sind die Vorgänge im zweiten Fall. Für den ersten Fall wurden bisher mit Hilfe von mathematischen Modellansätzen nur wenige, rein theoretische Ergebnisse erzielt. Anhand von Experimenten konnte aber eine Vielfalt von gegenseitigen Beeinflussungsmöglichkeiten festgestellt werden, die sich in eine geordnete Übersicht bringen lassen. Dabei handelt es sich zunächst um Schwärme, bei denen die Partikel jeweils die gleiche Dichte und Größe sowie eine kugelförmige Gestalt besitzen. Es werden verschiedene Gruppenbildungen beobachtet, wobei die Zweier-Gruppe mit insgesamt sieben Konfigurationen die vielseitigste darstellt. Die Konfigurationen unterscheiden sich durch die Art der Platzwechselvorgänge, der Drehungen oder der Schwingungen. Die schwingenden Systeme erweisen sich gegenüber Störungen als besonders stabil. Dreier-Gruppen haben teilweise eine geringere Sinkgeschwindigkeit als Zweier-Gruppen. Bei den Vierer-Gruppen unterscheidet man ringförmige und kettenförmige Systeme, wobei die Sinkgeschwindigkeit der Ketten stets größer ist als die der Ringe. Fünfer- und Siebener-Gruppen sind relativ selten, da ihre Konfigurationen sehr instabil sind. Sechser- und Achter-Gruppen treten demgegenüber wieder häufiger auf.

Befinden sich in einem Schwarm sowohl kugel- als auch zylinderförmige Teilchen, so beobachtet man grundsätzlich

ähnliche Konfigurationen wie bereits beschrieben, jedoch jeweils nur Gruppen bis zu vier Partikeln. Bedeutsam, insbesondere für die Bewegungsvorgänge in Flugwolken, ist die Erkenntnis, daß mit zunehmender Reynolds-Zahl, also bei größer werdendem Einfluß der Trägheitskräfte, die stabilen Partikelgruppen zerfallen.

In der Diskussion wurde festgestellt, daß die geschilderten Gruppenbildungen bei der normalen Sedimentation nur sehr kurzzeitig auftreten können und somit für diese Bewegungsvorgänge von untergeordneter Bedeutung sind. Der mittlere Partikelabstand bei den verschiedenen Konfigurationen entspricht etwa dem Teilchendurchmesser. Je ruhiger die Strömungsverhältnisse sind, desto ruhiger verhalten sich auch die Konfigurationen der Partikel. Allgemeingültige Gesetzmäßigkeiten für das Auftreten oder für den Zerfall bestimmter Konfigurationen lassen sich noch nicht angeben.

Partikelbewegung bei der Sedimentation von Mehrkornsuspensionen

Dipl.-Ing. A. Kaskas, Technische Universität Berlin

Die stationäre Sinkgeschwindigkeit eines Einzelteilchens hängt in einem unendlich ausgedehnten Medium von der Größe und der Form sowie von den Stoffwerten der Partikel und des Fluids ab. Die Bewegung von Partikeln gleicher Dichte aber unterschiedlichen Durchmessers ist in einer Suspension zusätzlich eine Funktion von der Volumkonzentration und von den Durchmesserhältnissen des Feststoffs sowie von den Konzentrationsverhältnissen der Partikelgrößen.

Die Partikelbewegung in Mehrkornsuspensionen wird zunächst mit Hilfe eines einfachen Modells für eine Dreikornsuspension mit fester Konstellation der Teilchen theoretisch untersucht. Bei höheren Volumenkonzentrationen läßt sich die Verringerung der Sinkgeschwindigkeit gegenüber dem Einzelteilchen auf zwei physikalische Vorgänge zurückführen: Einmal auf die durch das Absinken der Körner verursachte Gegenströmung und zum anderen auf den verstärkten Impulsaustausch. Aus den Rechnungen lassen sich die Geschwindigkeiten der einzelnen Korngrößen in der Suspension ermitteln.

Es wurden Suspensionen mit einer bis vier Kornfraktionen experimentell untersucht. Dabei wurden die Durchmesser- und Konzentrationsverhältnisse der Kornklassen stufenweise zwischen 0,05 und 0,5 Vol.-% erhöht. Die theoretischen Beziehungen geben die Meßwerte der Geschwindigkeiten für Suspensionen mit ein bis vier Kornklassen mit gleichgroßen Volumenanteilen der Kornfraktionen gut wieder. Durch Erweiterung der Modellrechnung unter Berücksichtigung der tatsächlichen Konzentrationsverhältnisse ergibt sich auch bei den Messungen mit unterschiedlichen Volumenanteilen eine gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment.

In der Diskussion wurde erläutert, daß die Geschwindigkeitsmessung in der Suspension indirekt über die Geschwindigkeiten der Sedimentationstrennschichten vorgenommen wurde, da die Entmischung stets hinreichend scharfe Trennschichten verursacht. Außerdem wurde auf die grundsätzliche Bedeutung dieser Untersuchungen für die Partikelbewegung in Schwärmen mit hoher Volumenkonzentration hingewiesen. Für den verstärkten Impulsaustausch, (erhöhte innere Reibung der Flüssigkeit), hat sich der Ansatz von *Ladenburg* für die Berücksichtigung des Wandeinflusses beim Absinken einer Kugel in einem zylindrischen Rohr als sinnvoll und nützlich erwiesen.

Entmischungserscheinungen in nichthomogenen Korngemischen in einer Flüssigkeit

Jr. C. W. J. van Koppen, N. V. Nederlandse Staatsmijnen, Geleen

In Setzmaschinen soll die Rohkohle durch eine periodische vertikale Wasserbewegung entsprechend den unterschiedlichen Dichten möglichst vollständig in Kohle, Verwachsenes und Berge getrennt werden. Es finden sich jedoch kleine Kohleteilchen zwischen den Bergen und feine Bergeteilchen zwischen den Kohlen, was nur teilweise auf den relativ großen Einfluß der Wasserbewegung auf den Setzvorgang der kleinen Körner zurückzuführen ist.

Eine Erklärung hierfür wird auf der Grundlage der Mayer-schen Potentialtheorie in Verbindung mit den Gesetzen für die Schüttdichte von Korngemischungen gegeben. Demnach strebt eine Kornmasse der niedrigsten Gesamtschwerpunktslage zu: In einer Mischung bewegen sich die Körner mit hoher Dichte, wenn sie durch Rühren oder Schwingen mobilisiert werden, nach unten und die mit niedriger Dichte nach oben. Zugleich streben die Körner auch nach einer maximalen Schüttdichte, weil damit ebenfalls eine niedrigere Schwerpunktslage verbunden ist. Grobkörnige Schüttungen saugen demzufolge aus benachbarten Schichten das fehlende feine Material an. Dies geschieht so lange, bis das Hohlraumvolumen der grobkörnigen Schicht mit feinkörnigem Material ausgefüllt ist.

Mit jeder Trennung nach der Dichte ist also grundsätzlich die Tendenz verbunden, die Korngrößenunterschiede zwischen den einzelnen Schichten auszugleichen. Diese Tendenz läßt sich weitgehend unterdrücken, wenn das Aufgabegut in Setzmaschinen eine möglichst gleichmäßige Korngröße besitzt²⁾.

In der Diskussion wurde darauf hingewiesen, daß man mit Hilfe dieser Untersuchungen eine Antwort auf die Frage erhofft, inwieweit sich Setzmaschinen überhaupt noch verbessern lassen. Außerdem können auch wichtige Aufschlüsse zu dem Problem der Entmischung in Wirbelschichten erwartet werden. Die bisherigen Untersuchungen für Zweikorn-Gemische sollen auf Mehrkorngemische ausgedehnt werden.

Theorie und Anwendung des Drehrohrförderers für fließfähige und fluidisierte Schüttgüter

Dr.-Ing. R. Jung, L. & C. Steinmüller GmbH, Gummersbach

Der Fließvorgang von körnigen Schüttgütern innerhalb eines Drehrohrs wurde auf der Grundlage theoretischer Überlegungen für verschiedene Rohrdurchmesser, Drehzahlen und Neigungswinkel experimentell untersucht. Solange die Zentrifugalbeschleunigung an der Rohrwand im Vergleich zur Erdbeschleunigung sehr klein bleibt, läßt sich der durch das Drehrohr ausfließende Feststoffstrom theoretisch berechnen. Dazu wurden die Gleichgewichtsbedingungen in der freien Böschung des fließenden Haufwerks und die Kontinuitätsbedingung herangezogen. Bei größeren Drehzahlen, wenn die Zentrifugalkraft in gleicher Größenordnung wie die Erdbeschleunigung ist, können die Versuchsergebnisse mit Hilfe von Ähnlichkeitsbetrachtungen gedeutet werden. Bei der Verwendung eines Drehrohrs als Dosiervorrichtung ist für ein ungestörtes Nachfließen des Schüttguts zu sorgen. Bei

begrenzter Fließfähigkeit hat sich eine oszillierende Gutaufgabe für das Förderrohr bewährt.

Feinstaub, der innerhalb eines Bunkers fluidisiert wird, fließt durch ein rotierendes Rohr wie eine Flüssigkeit aus. Hierbei liegt eine gleichmäßige Konzentrationsverteilung über den Rohrquerschnitt vor, und die Dichte des Fördergemisches erreicht etwa die Größenordnung der Schüttdichte. Eine Entmischung der Phasen wird infolge der Rotation selbst bei langen Rohren vermieden. Erst ein Stillsetzen des Drehrohrs führt zu einer Unterbrechung des Ausfließvorgangs.

In der Diskussion wurden die sehr zuverlässige Arbeitsweise und die große Anpassungsfähigkeit des Drehrohrförderers bei veränderten Betriebsbedingungen hervorgehoben. Bei nicht selbsttätig fließenden Gütern empfiehlt sich eine Fluidisierung bis knapp oberhalb der Lockerungsgrenze. Als Anhaltswert für die Winkelgeschwindigkeit eines Drehrohrs mit dem Radius R wurden die Froude-Zahl $Fr = R\omega^2/g \leq 0,6$ bis 0,7 genannt.

Verweilzeit von Partikeln in einer mehrstufigen Rieselsboden-Wirbelschicht

Dipl.-Ing. J. Mühle (Vortragender) und
cand. ing. M. Schmidt, Technische Universität Berlin

Es wurde über eine mehrstufige Wirbelschicht berichtet, bei welcher das Fluid und die Partikel im Gegenstrom durch dieselben gleichmäßig über den Säulenquerschnitt verteilten Bodenöffnungen hindurchtreten. Dieses Verfahren gestattet eine größtmögliche Ausnutzung des Apparatevolumens und ist für kontinuierlich betriebene Wärme- und Stoffübergangsprozesse sehr geeignet. Die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen geben Aufschluß über den Druckverlust und die Feststoffkonzentration einer Wirbelschichtstufe in Abhängigkeit vom Durchsatz an Fluid und von Eigenschaften des verwendeten Feststoffs.

Als weitere wichtige Größe für die Auslegung einer mehrstufigen Rieselsboden-Wirbelschicht wurde die mittlere Verweilzeit der Partikel in der Anlage untersucht. Diese ist für die in der Wirbelschicht übertragene Wärme oder für die umgesetzte Stoffmenge von Bedeutung. Die mittlere Verweilzeit wurde an einer Laboranlage für verschiedene Stufenzahlen mit Hilfe einer Ausfließmessung bestimmt. Als Einflußgrößen werden dabei die Volumenkonzentration und die Partikeleigenschaften verändert. Neben der mittleren Verweilzeit ist aber auch die Verweilzeitverteilung von Interesse, da hieraus Rückschlüsse auf die Gleichmäßigkeit der Feststoffbehandlung möglich sind. Die Verweilzeitverteilung wurde mit einer magnetisch markierten Partikel auf induktivem Wege festgestellt. Dabei zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit theoretischen Ergebnissen, die sich mit einem für mehrstufige Systeme erweiterten Diffusionsmodell herleiten lassen. In jeder Wirbelschichtstufe liegt demnach eine angenähert ideale Durchmischung der Partikel vor, und die Verweilzeitstreuung nimmt mit der Wurzel aus der Stufenzahl ab.

In der Diskussion wurde auch die Anwendung von Strahlungsmeßverfahren erörtert. Dabei ist zu beachten, daß eine radioaktive Markierung von Partikeln stets umfangreiche Sicherheitsmaßnahmen erforderlich macht, wenn die für Langzeitversuche benötigten Halbwertszeiten erreicht werden sollen. Die induktive Methode ist somit weniger aufwendig und bequemer zu handhaben. Hierbei wird die Partikel mit einem sehr kleinen Permanent-Magneten versehen. Allerdings erfordert das Präparieren größte Sorgfalt, damit Masse und Form des Meßteilchens gegenüber den anderen Teilchen der Wirbelschicht unverändert bleiben.

²⁾ C. W. J. van Koppen: Ein Beitrag zu den Grundlagen des Setzvorganges; Fifth International Coal Preparation Congress, Section B: Paper 3.

Feststoff-Kreislauf in einem Flüssigkeit-Feststoff-Wirbelschicht-System

Dipl.-Ing. R. Rödel (Vortragender) und Dr.-Ing. G. Kunz, GHH-M.A.N.-Technik, Gesellschaft für Anlagenbau mbH, Essen

Bei kontinuierlich betriebenen Ionenaustausch-Anlagen mit mehrstufigen Wirbelschichtsystemen interessiert im Zusammenhang mit dem Austauscher-Kreislauf der hydraulische Feststofftransport in senkrechten Röhren. Als Einflußgrößen für den Mengenstrom des Austauscherharzes sind hierbei der Durchsatz und die Stoffeigenschaften der Flüssigkeit, die Form und die Stoffeigenschaften der Partikel sowie der relative Lückengrad in Betracht zu ziehen. Die sich im senkrechten Förderrohr einstellende Relativgeschwindigkeit zwischen den Partikeln und dem Fluid läßt sich mit Hilfe bekannter allgemeiner Beziehungen als Funktion der Archimedes-Zahl und des relativen Lückengrades darstellen. Die experimentellen Ergebnisse stehen im guten Einklang mit den theoretisch gewonnenen Beziehungen.

In der Diskussion wurde darauf hingewiesen, daß das Hauptproblem dieser Untersuchung auf die Gesetze für die Sinkgeschwindigkeit von Partikeln im Schwarm hinausläuft. In diesem Fall hat sich der Ansatz von *Richardson* und *Zaki* bewährt.

Untersuchungen an Gas/Feststoff-Systemen bei der Entwicklung eines neuen Verkokungsverfahrens

Dr. H.-D. Schilling, Bergbau-Forschung, Essen-Kray

Der Vortragende berichtet über die Entwicklung eines neuen, kontinuierlich betriebenen Verkokungsverfahrens zur Erzeugung von Formkoks. Das Hauptorgan der ersten Verfahrensstufe ist ein Schweler, in dem etwa 70% der feinkörnigen Kohle in einem Fluidatbett bei 800 °C verkocht werden.

An einer mit Luft als Wirbelmedium betriebenen Modellanlage wurde zunächst die geringste und damit wirtschaftlichste Höhe des Schwelraumes bestimmt. Die Modellanlage war aufgrund einer Dimensionsanalyse so ausgelegt, daß eine Übertragung der gewonnenen Ergebnisse auf tatsächlich erforderliche Betriebsbedingungen möglich ist. Weitere Untersuchungen befaßten sich mit der Erzeugung der nötigen Verkokungswärme mittels Teilabbrand des Wirbelgutes in Luft. Die Feinkohle wird pneumatisch getrocknet und vertikal von unten in das Fließbett eingeblasen. Dabei können insbesondere bei Fettkohle Agglomerate entstehen, die auf den Anströmboden absinken und infolge Verschlackung zu Betriebsstörungen führen. Dieser Vorgang wurde in einem Film anhand eines Kaltmodells erläutert.

Ein weiteres Problem betrifft die Förderung des heißen Schwelgutes aus dem Schweler in ein Mischaggregat. Hierbei läßt sich eine kontrollierte und regelbare Mengenzuteilung mit Hilfe einer Schnecke erreichen.

Tröpfchengrößenmessungen im Bereich von 0,2 bis 10 µm mit einem Kaskadenimpaktor

Dr. A. Bürkholz, Farbenfabriken Bayer AG, Leverkusen

Der untersuchte Kaskadenimpaktor arbeitet nach dem Prinzip der Prallabscheidung. Hierbei wird ein Gasstrahl durch eine Reihe von hintereinander geschalteten Düsen mit abnehmendem Durchmesser geschickt. Senkrecht zum Düsenaustritt sind jeweils Prallplatten angeordnet, an denen der Luftstrahl in Form einer Staupunktströmung umgelenkt

wird. Hierbei scheiden sich die Aerosole, gestuft nach ihrer Größe, auf den Prallplatten ab. Es lassen sich somit Größe und Anzahl der in einem Gasstrom transportierten Tröpfchen bestimmen.

Der Kaskadenimpaktor ist eichfähig und hat sich im Bereich von etwa 0,2 bis 10 µm als ein zuverlässiges und leicht zu handhabendes Meßgerät mit vielen Anwendungsmöglichkeiten erwiesen. Es wurden beispielsweise die Tropfenspektren von Schwefelsäure-, Salz-, Farb- und Teer-Aerosolen bestimmt. Die abgeschiedenen Mengen liegen bei 1 mg und werden quantitativ durch Titration, Leitfähigkeits- oder Extinktionsmessungen bestimmt. Es wurden der Fraktionsabscheidegrad von Tröpfchenabscheidern (Drahtgewebe, Zyklone, Umlenkabscheider) und Tropfenspektren bei der Wasserzerstäubung und -verdüsung gemessen.

In der Diskussion wurde darauf hingewiesen, daß der Kaskadenimpaktor auch für Staubanalysen geeignet ist. Die kleinste noch nachweisbare Partikelgröße liegt etwa bei 0,05 µm.

Ermittlung der Abhängigkeit des Wandreibungsbeiwertes von Zyklonabscheidern von der Reynolds-Zahl aus Geschwindigkeitsmessungen

Ing. W. Krambrock (Vortragender) und Dr.-Ing. E. Muschelknautz, Farbenfabriken Bayer AG, Leverkusen

Die Abscheideleistung und der Druckverlust von Zyklonen werden durch die maximale Umfangsgeschwindigkeit im Abscheideraum bestimmt, deren Größe von den Einlaufverhältnissen, den geometrischen Daten sowie von der Wandreibung abhängt. Da über die Wandreibungsbeiwerte bisher nur pauschale Angaben vorliegen, wurden Versuche mit einem schlanken, zylindrischen Modellzyklon vorgenommen. Die Einlaufgeschwindigkeit wurde mit einer Sonde und die der maximalen Umfangsgeschwindigkeit mit Hilfe eines Flügelrädchens gemessen, bei dem der Reibungseinfluß ausgeschaltet war. Aufgrund dieser beiden Geschwindigkeiten ließ sich jeweils der Wandreibungsbeiwert λ berechnen. Die Untersuchungen wurden über den gesamten praktisch in Betracht kommenden Bereich der Reynolds-Zahlen für bezogene Wandrauigkeiten $D/k_s = 1,72 \cdot 10^2$ bis $7,7 \cdot 10^4$ ausgeführt. Die Ergebnisse konnten in der Form $\lambda = f(\text{Re}, D/k_s)$ in einem Diagramm zusammengefaßt werden. Die Druckverlustmessungen bestätigten die bekannte Abhängigkeit des Tauchrohrdruckverlust-Beiwertes vom Drall mit größerer Genauigkeit und führten außerdem im Bereich geringeren Dralls zu einer Erweiterung der hierzu bereits bekannten Ergebnisse.

In der Diskussion wurde die große praktische Bedeutung der λ -Werte für die Auslegung von Zyklonen hervorgehoben.

Berechnung der Fraktionsabscheidegradkurve eines Zyklonabscheiders

Dr.-Ing. W. Rausch, Luitpoldhütte AG, Amberg

Bei der rechnerischen Ermittlung des Fraktionsabscheidegrades eines Zyklons muß die Geschwindigkeitsverteilung möglichst vollständig bekannt sein³⁾. Hierzu wurde die Meridianströmung im Zyklon mit einem Sandbettmodell aufgrund von Druckverteilungsmessungen unter der Voraus-

³⁾ W. Rausch, Verfahrenstechnik 3, 214/21 [1969].

setzung einer ebenen Potentialströmung berechnet. Den hieraus gewonnenen Axial- und Radialgeschwindigkeiten ist eine Umfangsgeschwindigkeit mit Potentialwirbel-Charakter überlagert worden. Durch Kräftebetrachtungen für einzelne Staubbpartikeln ergeben sich Trennflächen, in denen die Zentrifugalkraft gerade gleich dem Luftwiderstand ist. Für jeden Korndurchmesser läßt sich eine sogenannte Grenzteilchenbahn angeben, welche die dazugehörige Trennfläche tangiert und bei der mit 50proz. Wahrscheinlichkeit noch eine Abscheidung erfolgt. Werden die Partikelzahl im Eintrittsquerschnitt gleich 100% gesetzt und der Eintrittsquerschnitt in die Zyklonströmung ebenso wie die Grenzteilchenbahn auf die senkrecht dazu stehende Meridianebene projiziert, so erhält man durch Ausplanimetrieren der Flächenteile außerhalb und innerhalb der Grenzteilchenbahn für die jeweils betrachtete Partikelgröße den Fraktionsentstaubungsgrad.

In der Diskussion wurde das Verfahren zur Geschwindigkeitsbestimmung im Zyklon kritisiert, weil insbesondere die tatsächlichen Vorgänge in größerer Entfernung von der Tauchrohröffnung weitgehend unberücksichtigt bleiben. Ebenso läßt die als Versuch bezeichnete Betrachtungsweise die sehr komplizierten Grenzschichtvorgänge im Zyklon außer acht, obwohl gerade diese von entscheidendem Einfluß für den Fraktionsentstaubungsgrad sein dürften. Es wurde deutlich, daß weitergehende theoretische Untersuchungen einen sehr erheblichen mathematischen Aufwand erfordern.

Zyklonähnliches Abscheidesystem mit sehr niedrigem Grenzkorn

Dipl.-Ing. G. Otte, Klöckner-Humboldt-Deutz AG, Hoffnungsthal

Bei großen Staubgasströmen ist man häufig bestrebt, eine möglichst gute Vorreinigung zu erzielen, damit die Aufwendungen für die notwendigen Feinstentstaubungsanlagen klein gehalten werden können. Das hierzu entwickelte zyklonähnliche Abscheidesystem wird tangential angeströmt und sowohl über ein Tauchrohr als auch über eine Auslaufspirale am unteren Ende des zylindrischen Teiles des Zyklons abgeströmt. Die Versuche zeigen, daß der durch das Tauchrohr abgezogene Teilgasstrom weitgehend entstaubt ist und direkt ins Freie geleitet werden kann. Es wurden die Eintauchtiefe des Tauchrohres, das Teilungsverhältnis der Gas-mengen, die Staubkonzentration und die Kornzusammensetzung des Staubes variiert. Bei einer Teilgasmenge bis zu 50% des Gesamtgasstromes ergab sich am Tauchrohraustritt ein Reststaubgehalt von ungefähr 30% aller Teilchen kleiner als 3 µm. Fraktionen über 3 µm konnten nur in Spuren gefunden werden.

In der Diskussion wurde auf die Bedeutung des zweifach abgesaugten Zyklons für die Entlastung von Elektrofilteranlagen hingewiesen. Der festgestellte Einfluß der Tauchrohrlänge entspricht den bekannten Verhältnissen beim normalen Zyklon.

Zur Hydrodynamik der Rinnsale

Dipl.-Ing. J. Kern, Technische Universität Berlin

Als Rinnsal gilt ein an zwei verschiedene Phasen grenzender Flüssigkeitsstrom, dessen Breite und Höhe von gleicher Größenordnung sind. Diese bisher nur wenig untersuchte Strömungsform kann den Stoff- und Wärmeübergang in Kondensatoren, Kühltürmen und Austauschkolonnen maßgebend beeinflussen. Bei der Behandlung der Hydrodynamik

der Rinnsale sind verschiedene typische Strömungsformen gegeneinander abzugrenzen. Strömt die Flüssigkeit unter dem Einfluß von Trägheits-, Feld-, Zähigkeits- und Oberflächenspannungskräften an einer senkrechten Ebene herunter, so entspricht die Phänomenologie erwartungsgemäß teilweise der des Rieselfilms und teilweise der des Freistrahls, wobei außerdem einige charakteristische Zwischenformen auftreten. Der Bereich des laminaren Rinnsals wurde näher untersucht. Hierfür ließ sich unter vereinfachenden Annahmen eine Theorie herleiten, deren Ergebnisse in dimensionsloser Form dargestellt wurden. Als variable Einflußgrößen treten dabei der Randwinkel zwischen der Flüssigkeit und dem Feststoff sowie die Dichte und die Zähigkeit der Flüssigkeit auf. Die Meßergebnisse wurden durch die Theorie gut wiedergegeben.

In der Diskussion wurde darauf hingewiesen, daß die Abhängigkeit der mittleren Filmdicke von der Reynolds-Zahl beim Rinnsal und beim Rieselfilm sehr ähnlich ist. Die kritische Reynolds-Zahl für den Umschlag vom laminaren zum turbulenten Strömungsverhalten hat jedoch beim Rinnsal einen sehr viel größeren Wert, was sich auf den stabilisierenden Einfluß der Oberflächenspannungskräfte zurückführen läßt. Das Ziel der Untersuchungen ist es, Kriterien für das Auftreten von Rinnsalen zu ermitteln.

Druckverlust von Absorptionssäulen mit geordneter Füllkörperschichtung

Dr.-Ing. N. Kolev, Bulgarische Akademie der Wissenschaften, Sofia

Auf Grund von eigenen und fremden Meßergebnissen wurden für geordnete Füllkörperschichten aus keramischen Raschig-Ringen, Kreuzringen, bienenwabenförmigen Füllkörpern und für fluchtende oder versetzte Lattengitter aus Holz empirische Widerstandsgesetze zunächst für den Druckverlust ohne Berieselung hergeleitet. Der Einfluß der Reynolds-Zahl wird sowohl durch Re^n als auch durch $(K_1/Re + K_2/Re^{0.4})$ berücksichtigt, wobei K_1 und K_2 empirische Konstanten sind. Die Ergebnisse zeigen, daß die auf den hydraulischen Durchmesser bezogene Höhe der Füllkörperelemente mit der Potenz $-0,5$ eingeht. Außerdem ist der relative Lückengrad von sehr großem Einfluß. Die Versuchsergebnisse wurden mit einem mittleren Fehler von 11% wiedergegeben, wobei der gesamte technisch interessierende Anwendungsbereich erfaßt wird.

Für den Druckverlust von berieselten, geordneten Füllkörperschichten wurde ebenfalls eine Gleichung angegeben, die im gesamten Bereich oberhalb und unterhalb des Flutpunktes gültig ist. Als hydrodynamische Parameter treten hierbei die Reynolds- und die Froude-Zahl der Flüssigkeit, die Froude-Zahl des Gases und als geometrische Kennzahlen die dimensionslose Höhe sowie der relative Lückengrad der Füllkörperpackung auf. Es wurde gezeigt, daß diese Beziehung auch für die Berechnung des Flut- und Sprudelpunktes verwendet werden kann.

In der Diskussion wurde ergänzt, daß bei einer geordneten Füllkörperschichtung die berieselte Oberfläche sich nur wenig gegenüber der ungeordneten Packung vergrößert, der Druckverlust sich jedoch um etwa 60 bis 80% verringert. Bei der Schwefelsäure-Fabrikation konnte beispielsweise mit einer geordneten Füllkörperschichtung die Produktmenge um das Vierfache gegenüber einer ungeordneten Schüttung erhöht werden. Ein Grund hierfür ist darin zu suchen, daß der Flut- und Sprudelpunkt erst bei bedeutend größeren Gasdurchsätzen liegt, wodurch sich höhere Stoffübergangszahlen erzie-

len lassen. Bei der Rektifikation wurde jedoch von einer Verschlechterung des Stoffübergangs bei geordneter Füllkörpererschichtung berichtet.

Messung des Dampfvolumenanteiles mittels γ -Strahlen-Abschwächung bei Zweiphasenströmung von Wasser/Wasserdampf in Rohren

Dr.-Ing. A. Kütükcüoğlu,
Eidgenössige Technische Hochschule Zürich

Aus der Abschwächung eines kollimierten γ -Strahles beim Durchqueren einer von Wasser/Wasserdampf durchströmten Rohrstrecke wurden die örtliche Flüssigkeitsverteilung und der mittlere Dampfvolumenanteil ermittelt. Als Strahlungsquelle diente das Isotop ^{51}Cr . Die γ -Intensität wurde mit einem NaJ-Kristall-Szintillationszähler gemessen. Die γ -Quanten wurden mit Hilfe eines Mehrkanalanalysators in 100 Energiestufen gruppiert und über bestimmte Zeitspannen aufsummiert. Dadurch ließ sich die der Photolinie zugeordnete Energie der γ -Quanten von der niederenergetischen Untergrund- und Compton-Strahlung separieren. Die an dem verwendeten Hochdruck-Verdampfungskreislauf untersuchten Parameterbereiche waren:

Druck:	$p = 20$ und 30 bar,
Massenstromdichte:	$G = 10^3, 2 \cdot 10^3$ und $4 \cdot 10^3$ kg/s m ²
Massenstromverhältnis des Dampfes:	$\dot{x} = 0,05$ bis $0,58$
Wärmestromdichte:	$\dot{q} = 0,25$ bis $1 \cdot 10^6$ W/m ²
Versuchsstrecke:	Rohr aus rostfreiem Stahl, $d = 10$ mm Dmr.; horizontal und vertikal, beheizt und unbeheizt.

Hierbei beeinflussen der Druck und die Massenstromdichte den mittleren Dampfvolumenanteil über den Durchflußquerschnitt nur unwesentlich. Bei vertikaler Rohranordnung liegen die Meßresultate 10 bis 20% höher als bei horizontaler Strömungsrichtung. Der mittlere Dampfvolumenanteil nimmt mit steigender Wärmebelastung zu. Sowohl die Strömungsrichtung als auch die Wärmezufuhr haben bei niedrigen Massenstromdichten einen stärkeren Einfluß auf den Dampfvolumenanteil⁴⁾.

Bei der Diskussion wurden einige Besonderheiten des verwendeten Meßverfahrens erörtert. Die Genauigkeit ergab sich bei einem 10proz. Fehler in der Zählrate zu $\pm 10\%$ für den Dampfvolumenanteil. Als Vorteil wurde hervorgehoben, daß die örtliche Flüssigkeitsverteilung zu ermitteln war.

Zur Berechnung des Strömungsdruckverlustes von einphasig durchströmten Füllkörperrohren und -säulen

Prof. Dr.-Ing. E. Blaß und Dipl.-Ing. W. Reichelt
(Vortragender), Technische Hochschule Clausthal

Füllkörperrohre sind von technischer Bedeutung, wenn beim Ablauf eines physikalischen Trennverfahrens oder bei chemischen Reaktionen Wärmeströme zu- oder abgeführt werden müssen. Während für Füllkörpersäulen größeren Durchmessers, $D/d_p > 8$ bis 10, eine Vielzahl von Untersuchungen über die ein- und zweiphasige Durchströmung mit und ohne

Stoffübertragung vorliegen, ist dies für Füllkörperrohre noch nicht der Fall.

In einem ersten Versuchsabschnitt wurde deshalb zunächst der Strömungsdruckverlust von Luft in Rohren und zum Vergleich auch in Säulen gemessen, die mit dünn- und dickwandigen Raschig-Ringen aus Metall, Steinzeug und Porzellan gefüllt waren. Das Verhältnis aus Säulen- bzw. Rohrdurchmesser und Füllkörperdurchmesser wurde im Bereich $1,6 \leq D/d_p \leq 25$ variiert. Aufgrund der Meßergebnisse ließ sich eine empirische Gleichung für den Druckverlust einphasig durchströmter Raschig-Ring-Schüttungen angeben. Dieser Beziehung liegt das Widerstandsgesetz von Ergun zugrunde, wobei für den kennzeichnenden Durchmesser der Raschig-Ringe der Ansatz von Brauer unter Einbeziehung des Säulendurchmessers erweitert wurde.

In der Diskussion wurde der Einfluß der Randgängigkeit bei kleinen Säulendurchmessern erörtert. In ungünstigen Fällen muß damit gerechnet werden, daß bis zu 80% des Fluids die Schüttung in den Randzonen passiert. Die Unsicherheit bei der Ermittlung des relativen Lückengrades wird mit abnehmendem Säulendurchmesser größer.

Untersuchung der Ausblasvorgänge bei Siede- und Druckwasser-Reaktoren

Dipl.-Phys. G. Friz (Vortragender) und
Dipl.-Ing. W. Riebold, Euratom, Ispra

Das allgemeine Ziel dieser Untersuchungen ist das Studium der hydro- und thermodynamischen Folgen, die ein Bruch in einer Rohrleitung des Primärkühlkreislaufes nach sich ziehen. An einem flow-down-Kessel im Labormaßstab (21 Inhalt) wurde zunächst der Einfluß des Inertgasdruckes (2 bis 12 bar) und der Temperatur (20 bis 190°C) auf den Massendurchsatz und den Druckverlauf im Kühlmittel untersucht, wenn dieses nach einem Membranbruch durch ein vertikales Ejektionsrohr (10 mm Dmr.) ausströmt. Der Massendurchsatz zeigt dabei eine starke Abhängigkeit von Druck und Temperatur im Kessel: Bei zunehmenden Werten haben beide eine Verringerung des Massendurchsatzes zur Folge. Gleichzeitig wurde das zeitliche Verhalten des aus dem Ejektionsrohr austretenden Zweiphasen-Freistrahles anhand von Filmaufnahmen untersucht. Die Expansion des Freistrahls und der Druckabfall wurden als Funktion von Zeit, Druck und Temperatur dargestellt und mit Modellrechnungen verglichen.

An einer größeren Versuchsanlage wurden Ejektionsversuche mit einem in erzwungener Konvektion befindlichen Kühlmittel durchgeführt. Vor dem Bruch konnten stationäre Reaktorkühlbedingungen hinsichtlich Massendurchsatz, Eintrittsunterkühlung und Wärmezufuhr bzw. Dampfqualität am Austritt eingestellt werden. Der Bruch der Leitung wurde durch Schnellöffnung eines Kugelventils simuliert. Bisher sind die folgenden Versuchsbedingungen verändert worden:

Druckbereich: 15 bis 50 bar

Unterkühlung (Eintrittstemperatur: 20°C bis Sättigungstemperatur)

Massendurchsatz: 0,06 bis 0,15 kg/s (≈ 800 bis 2000 kg/m² s bzw. $\approx 0,8$ bis $2,0$ m/s Wassergeschwindigkeit)

Dampfqualität am Austritt: < 0 bis 30 Gew.-%.

Der Massendurchsatz nach dem Bruch hängt stark vom Systemdruck und der Dampfqualität am Austritt aus der beheizten Meßstrecke während des stationären Betriebes ab. Die untersuchten Parameter zeigen auch einen großen Einfluß auf den Impuls des Zweiphasen-Freistrahls sowie auf das

⁴⁾ Dr.-Ing. A. Kütükcüoğlu, Dissertation Nr. 4307 Zürich 1969, erschienen als VDI-Fortschrittsbericht, Reihe 7, Nr. 18, Düsseldorf 1969.

Zeitintervall nach dem Bruch, bis sich ein stationäres Verhalten des Strahles und mittlere Kühlmitteltemperaturen entlang der Meßstrecke eingestellt haben.

Druckabfall im senkrechten Rohr bei aufwärtsgerichteter Zweiphasenströmung von Frigen 12 ohne und mit Wärmezufuhr im Fall hoher Massenstromdichte

Dipl.-Ing. J. R. Napadensky und Dipl.-Ing. W. D. Kaufmann (Vortragender), Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

Die Untersuchungen wurden mit Frigen 12 in einem Rohr mit $d = 23$ mm Dmr. in den folgenden Parameterbereichen ausgeführt:

Massenstromdichte: $G = 240$ bis 2650 kg/s m²

Dampfvolumenanteil am Eintritt in die Meßstrecke: $\alpha = 0,03$ bis $0,75$

Wärmestromdichte: $\dot{q} = 0$ bis $0,3$ W/cm²

Druckverhältnis: $p/p_{kr} = 0,18$ bis $0,38$

Bei $\dot{q} = 0$ ergab sich eine deutliche Abhängigkeit des Druckabfalls von der Strömungsform. Die Meßergebnisse ließen sich mit zunehmender Ausbildung der Ringströmung nur unbefriedigend mit der Berechnungsmethode von Lockhart und Martinelli wiedergeben. Durch Erweiterung des Lockhart-Martinelli-Parameters mit der Froude-Zahl konnte jedoch eine gute Übereinstimmung der gemessenen Druckverlustwerte in senkrechten Rohren mit den berechneten erzielt werden.

Die Druckverlustmessungen bei Wärmezufuhr, $\dot{q} \neq 0$, wurden mit Hilfe einer empirischen Beziehung korreliert. Damit kann im untersuchten Bereich der Reibungsdruckverlust als Funktion der Wärmestromdichte und des durch die Froude-Zahl erweiterten Lockhart-Martinelli-Parameters mit einer Genauigkeit von $\pm 15\%$ berechnet werden.

In der Diskussion wurde darauf hingewiesen, daß sich bei Benutzung des Volumenstromverhältnisses des Dampfes bei konstanten Werten der Massenstromdichte und des Druckes nur wenig differierende Meßwerte ergeben. Der Dampfvolumenteil α wurde nicht direkt gemessen, sondern indirekt nach Lockhart und Martinelli berechnet. Die damit verbundene Unsicherheit läßt sich durch eine vergleichsweise Bestimmung von α über die Wärmezufuhr verringern.

Durchfluß zweiphasiger Gas/Flüssigkeits-Gemische durch Drosselorgane

Dr.-Ing. M. Heckle, Technische Universität Karlsruhe

Die bisherigen Berechnungsverfahren (Chenoweth und Martin, Sheldon und Schuder, Sharp) sind stets so aufgebaut, daß möglichst viele empirisch ermittelte Werte gut wiedergegeben werden. Das neu vorgeschlagene Verfahren der äquivalenten Dichten wurde hingegen durch eine größere Zahl von Messungen an sehr verschiedenartigen Drosselorganen lediglich überprüft. Bei der Methode der äquivalenten Dichten wird der aus der einphasigen Durchströmung bekannte Durchflußbeiwert des Drosselorgans, z. B. der k_v -Wert eines Stellventils, dazu benutzt, um auch den zweiphasigen Durchfluß zu berechnen. Die Anpassung an die zweiphasigen Verhältnisse geschieht über die Dichte, welche sich aus den verschiedenen Erhaltungssätzen unter der Annahme einer bestimmten Strömungsform, z. B. einer Ringströmung, als äquivalente zweiphasige Dichte herleiten läßt. Diese Methode sagt alle aufgenommenen Meßwerte bedeutend besser voraus, als die bisherigen empirischen Verfahren. Gewisse noch verbleibende Abweichungen wurden in ihrer Systematik erkannt.

In der Diskussion wurde ergänzt, daß sich bei dem neuen Verfahren die maximalen Abweichungen immer dann ergeben, wenn die Gas- und Flüssiganteile etwa gleichgroß sind.

Dipl.-Ing. J. Mühle [VB 1354]

Rohrleitungen in Chemieanlagen

Am 22. November 1968 fand in Essen eine von über 500 Teilnehmern besuchte Tagung über „Rohrleitungstechnik in der chemischen Industrie“ statt, zu der der Ausschuß „Rohrleitungstechnik“ der Verfahrenstechnischen Gesellschaft im VDI zusammen mit dem Haus der Technik e. V. eingeladen hatte. Die Leitung der Veranstaltung hatte Direktor Dipl.-Ing. Chr. Isting, Marl. Die sechs Vorträge dieser Tagung werden im folgenden kurz referiert*.

Gesetze, Vorschriften und Normrohrleitungen in Chemieanlagen

Obering. Dipl.-Ing. R. M. Zollinger, Deutscher Normenausschuß, Köln/Rh.

An dem einfachen Beispiel einer Anlage, bestehend aus Dampferzeuger, Reaktionsgefäß, Speicher und den verbindenden Rohrleitungen, erläuterte der Vortragende die Viel-

falt der Gesetze, Verordnungen, Vorschriften auf gesetzlicher Grundlage sowie der verschiedenen Normen und ähnlicher Regelwerke, welche angewendet oder beachtet werden müssen. Der Dampferzeuger und der Druckbehälter sind überwachungspflichtige Anlagen im Sinne der Gewerbeordnung. In einer allgemeinen Verwaltungsvorschrift ist das Verfahren für Anträge zur Erlaubnis des Betriebes von Dampfkesselanlagen in den Einzelheiten festgelegt. Durchführungsbestimmungen allgemeiner Art sind in Form einer Rechtsverordnung in der Dampfkesselverordnung festgelegt. Hersteller und Betreiber werden in einem technischen Regelwerk über den Stand der Technik unterrichtet. Als Bestandteil dieses Regelwerkes gelten auch die DIN-Normen, wobei jedoch diese Normen ausdrücklich vom Herausgeber des Regelwerkes gebilligt sein müssen.

Diese technischen Regeln im Sinne der Dampfkesselverordnung werden von einem Sachverständigenausschuß der Bundes- und Länderbehörden, der Industrie, der technischen Überwachungsvereine sowie der Wissenschaft aufgestellt.

Reaktionsgefäß und Speicher sind Druckgefäße; sie gelten auch als überwachungspflichtige Anlagen gemäß der Gewerbeordnung. Sofern die Druckbehälter nicht für Druckgas,

* Fünf Vorträge sind im Wortlaut in Heft 199 der Schriftenreihe Haus der Technik – Vortragsveröffentlichungen, Essen, inzwischen erschienen.

Acetylen oder brennbare Flüssigkeiten verwendet werden, gelten keine besonderen Rechtsverordnungen. Statt dessen sind als Vorschrift auf gesetzlicher Grundlage die Unfallverhütungsvorschriften für Druckbehälter anzuwenden. Diese Unfallverhütungsvorschriften legen wie eine Verordnung aber nur Ziele fest, welche nach den geltenden technischen Regeln zu beachten sind, wobei die Unfallverhütungsvorschriften die AD-Merkblätter als technische Regeln bezeichnen.

Während die Unfallverhütungsvorschriften von dem Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften aufgestellt und herausgegeben werden, werden die AD-Merkblätter von der Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter, welcher die Fachverbände der Hersteller, Benutzer sowie der Technischen Überwachungsvereine, aber keine Behördenvertreter angehören, herausgegeben. Im Gegensatz zu den technischen Regeln für Dampfkessel werden die Druckbehälter-Regeln frei vereinbart und unterliegen nicht einem ministeriellen Anerkennungsverfahren. Eine öffentliche Prüfung wie etwa bei den DIN-Normen ist jedoch ausgeschlossen.

Für die verbindenden Rohrleitungen bestehen normalerweise keine gesetzlichen Regelungen. Im allgemeinen gilt der Stand der Technik als berücksichtigt, wenn die Rohrleitungen nach DIN oder API berechnet und gebaut werden.

Überschreitet die Rohrleitung das Fabrikgelände, so gilt sie als Fernleitung und ist damit als Gasleitung dem Energiewirtschaftsgesetz oder als Produktleitung der Gewerbeordnung unterworfen. Je nach Medium ist sie entweder nur erlaubnispflichtig oder überwachungspflichtig. Außerdem unterliegt sie den Auflagen des Wasserhaushaltsgesetzes. Da die Verantwortung für die Ausführung dieses Gesetzes im allgemeinen bei der unteren Wasserbehörde liegt, unterliegen sie besonders störenden, schwer zu erfassenden und örtlich verschiedenen Auflagen. Bei entsprechenden Medien können für Fernleitungen auch die Verordnungen über brennbare Flüssigkeiten oder die Acetylen-Verordnung sowie deren nachgeordnete Vorschriften zur Anwendung kommen.

Gemäß Artikel 100 der Römischen Verträge sollen alle technischen Vorschriften und Regeln, welche den freien Handelsverkehr hemmen, im Bereich der EWG harmonisiert werden. Im Rahmen dieser Harmonisierung wird die Erstellung eines einheitlichen Regelwerkes unbedingt notwendig. Die gesetzliche Grundlage hierfür sollte sich von technischen Einzelheiten frei halten und darauf beschränken, festzulegen, was im allgemeinen Interesse auf dem Verordnungswege geregelt werden soll. Die Verwaltungsvorschrift sollte sich auf klare Anweisungen an die nachgeordneten Dienststellen beschränken, damit das Erlaubnis- und Genehmigungsverfahren ohne Beeinträchtigung des Wettbewerbes einheitlich gehandhabt wird. Entsprechend der großen Bedeutung dieses Regelwerkes ist zu fordern, daß an seiner Aufstellung alle Beteiligten mitwirken können, daß die vorläufigen Arbeitsergebnisse der öffentlichen Kritik zugänglich gemacht und berechnigte Sicherheitsanforderungen unbedingt berücksichtigt werden.

Es wird unumgänglich sein, gegebenenfalls auf gesetzlicher Grundlage zu klären, was Regeln der Technik sind. Die technischen Regeln selbst sind aber in Selbstverantwortung aller Beteiligten frei zu vereinbaren, was jedoch nicht ausschließt, daß auf Grund der im Gesetz verankerten Verantwortung die Verantwortlichen gegebenenfalls das Recht haben, bestimmte technische Regeln anzuerkennen. Hierfür kann als Muster die vierte Durchführungsverordnung zum Energiewirtschaftsgesetz dienen.

Planung und Montage von Rohrleitungen in Wärmeträgeranlagen

Dr.-Ing. R. Dieterich, Thyssen Rohrleitungsbau GmbH, Düsseldorf

Zur Planung der Rohrleitungen in Wärmeträger-Anlagen muß der Konstrukteur sich genauestens mit den physikalischen und chemischen Eigenschaften des Wärmeträgers und des zu erwärmenden Produktes vertraut machen. Hierzu gehört vor allem die Kenntnis der spezifischen Wärme, des spezifischen Gewichtes, des Zusammenhangs zwischen Druck und Temperatur, der Viskosität und der Stockpunkte sowie des chemischen Verhaltens gegenüber dem Rohr-Werkstoff. Eine genaue Kenntnis der bestehenden Regeln der Technik und der entsprechenden Normen für die Berechnung, die Abmessungen und die Werkstoffe ist erforderlich, um technischen und wirtschaftlichen Anforderungen, die an die Rohrleitungen in einer Wärmeträger-Anlage gestellt werden, zu genügen. Je besser der Konstrukteur die Normen dafür kennt, um so mehr werden sie ihm eine Hilfe sein und um so weniger wird er sie als lästige Behinderung empfinden. Durch entsprechende Bauüberwachung und Prüfung muß erzwungen werden, daß das Bauvorhaben den Berechnungen, Ausführungen und Qualitätsansprüchen des Planers entspricht. Anhand von Gewichts- und Wertaufstellungen wird gezeigt, welchen Anteil die Rohrleitungen am Gesamtumfang einer Wärmeträger-Anlage haben. Wesentliche Bedeutung haben die Berechnungen hinsichtlich der Wärmedehnung, die heute weitgehend mit Hilfe von elektronischen Rechenanlagen vorgenommen werden. Ein hohes Maß an Einfühlungsvermögen in die Leitungsführung muß vom Rohrleitungskonstrukteur erwartet werden, da erst gerechnet werden kann, wenn der Hauptleitungsverlauf festliegt. Anhand von Konstruktionsbeispielen wurden der Rohrleitungsverlauf in einer Wärmeträger-Anlage sowie Lösungsbeispiele für Doppelrohrleitungen dargestellt.

Rohrleitungen in Chemieanlagen: Beispiele von Schadensfällen und Maßnahmen zur Schadensabwehr

Prof. Dr.-Ing. H. Spähn, Badische Anilin- & Soda-Fabrik AG, Ludwigshafen/Rh.

Der Vortragende berichtete über einige Fehler, die bei der Rohrfertigung möglich sind. Als Beispiele für Fehler, die am Vormaterial auftreten können, wurden Tonerde-Einschlüsse genannt, die an der Innen- oder Außenfläche des Rohres zu schalenförmigen Einrisen führen. Grobe Einschlüsse in der Kernzone des Vormaterials (Lunkerausläufer), führen am Rohr zu schmalen, langgestreckten Wülsten an der Innenfläche. Primärlunker im Vormaterial, die auftreten, wenn der Block am Kopf zu wenig geschöpft wurde, ergeben Fehler in Form von Schuppen, meist an der Innenfläche des Rohres.

Fehler während der Fertigung des Rohres können mechanische Ursachen haben, z. B. das Einwalzen eines Fremdkörpers, etwa eine abgebrochene Dornspitze. Bei zu niedriger Walztemperatur kann es ebenfalls zur Ausbildung schuppenartiger Innenfehler kommen.

Von den Wärmebehandlungsfehlern wird als erstes Beispiel die Korngrenzen-Oxidation genannt, die in der Regel von einer Entkohlung begleitet ist. Hierdurch kann es zu bahnenförmig angeordneten Haar-Rissen im Rohr oder zur Bildung von Zunder-Narben auf der Luppe kommen; letzteres hat langgestreckte Außenriefen am Rohr zur Folge. Örtliche Aufkohlung beim Wärmen des Vormaterials hat Queraufrisse

zur Folge, welche meistens zeilenförmig an der Außenfläche des Rohres angeordnet sind.

Wie bei jedem technischen Erzeugnis kann auch beim Rohr eine völlige Fehlerfreiheit unter wirtschaftlichen Bedingungen nicht erreicht werden. Es kommt daher der Frage der Tolerierbarkeit der mittels zerstörungsfreier Prüfverfahren festgestellten Fehlererscheinungen große Bedeutung zu. Bei der Fehlerbewertung sind in aller Regel Außenfehler weniger kritisch. Als Beispiele für Ausnahmen wurden genannt:

- a) Bei Temperaturwechselbeanspruchung können Außenfehler als Kerben wirken.
- b) Im Fall der Zeitstandbeanspruchung bewirken tiefere Außenfehler eine unzulässige Waddickenverminderung besonders dann, wenn die Toleranzen ohnehin knapp liegen.

Innenfehler können und müssen in einem gewissen Rahmen toleriert werden. Bei statischer Beanspruchung kann ein weniger scharfer Bewertungsmaßstab zugrunde gelegt werden. Im Falle von Innendruckpulsationen dagegen können Innenfehler nur in geringem Umfang zugelassen werden. Auch dann, wenn die Gefahr des Auftretens lokalisierter Formen der Korrosion besteht, sind einige der genannten Innenfehler nicht tolerierbar. Hierzu gehört z. B. die Spaltkorrosion, die Spannungs- und Schwingungsrißkorrosion sowie der Lochfraß. Hier kann es in Falten, Aufrissen u. dgl. zur Anreicherung von Chlor-Ionen oder zur Ablagerung fester Stoffe kommen, was der einen oder anderen dieser Korrosionsarten Vorschub leistet.

In konstruktiver Hinsicht steht die nachgiebige Gestaltung von Rohrleitungen im Vordergrund. Wechseldehnungen durch Temperaturdifferenzen sind eine bekannte Ursache für das Versagen von Rohrleitungen. Da Wechseldehnungen von den Werkstoffen nur in einem begrenzten Umfang aufgenommen werden können, kommt der Arbeit des Konstrukteurs hier besondere Bedeutung zu. Dies gilt auch für plötzliche Temperaturänderungen (Thermoschock). Schließlich ist bei der Auslegung auch darauf zu achten, daß die Schwingungsbeanspruchung in erträglichen Grenzen gehalten wird. Außenbrüche durch Schwingungen in Rohrleitungssystemen sind nicht allzu selten und können oft nur nach der Methode des „Trial and Error“ eliminiert werden. Im Zusammenhang mit den konstruktiven Gesichtspunkten wurde auch auf die Bedeutung der schweißtechnischen Gestaltung und der Schweißausführung hingewiesen (Wurzelrückfall, Einbrandkerben und Endkrater als Korbstellen und Ausgangspunkte für Dauerbrüche sowie für die oben erwähnten Arten der lokalisierten Korrosion). Am Beispiel einer Elektrodenzündstelle auf einem austenitischen Stahl wurde dargelegt, weshalb hier besonders günstige Vorbedingungen für das Auftreten transkristalliner Spannungsrißkorrosion gegeben sind. Hingewiesen wurde schließlich auf Korrosionserscheinungen, die in engem Zusammenhang mit dem Schweißen stehen, zum Beispiel die interkristalline Korrosion und die Nahtrandkorrosion, eine Sonderform der interkristallinen Korrosion, die unmittelbar neben der Schweißnaht auftritt und darauf zurückzuführen ist, daß bei Temperaturen oberhalb 1200°C Carbide in Lösung gehen (oder sich z. B. im Falle der NiMo-Sonderlegierungen die Eisen-Molybdän- σ -Phase ausbildet). Es können sich dann bei tiefer Temperatur z. B. Chromcarbide ausscheiden. Derartige Vorgänge können zu einer Verarmung der Korngrenzenbereiche an Chrom oder Molybdän und damit zu selektiver Korrosion führen.

Betrieb eines Wärmeträgerkreislaufes

Dipl.-Ing. E. Gause, Chemische Werke Hüls AG, Marl

Es wurde über Erfahrungen und Erkenntnisse berichtet, die bei der Inbetriebnahme und Wartung einer Wärmeträgeranlage für die Energieversorgung einer Detergentienanlage mit $21 \cdot 10^6$ kcal/h bei einer Temperatur von 342°C gesammelt wurden. In dieser Anlage wurde erstmalig Marlotherm® S großtechnisch angewendet, das als flüssiger, organischer Wärmeträger in der Industrie bekanntgeworden ist.

Nach Beendigung der Rohrleitungsmontage ist zunächst das Gesamtsystem durch eine Druckprobe auf Dichtheit zu prüfen. Die in Wärmeträgerkreisläufen verwendeten Stahlrohre sind mit Rost- und Zunderschichten von etwa 0,4 bis 0,5 kg/m² Oberfläche bedeckt. Durch Spülung mit erwärmtem Wasser, dem etwa 0,2% Detergentien zur Entfettung zugefügt werden, können bis zu 50% dieser Eisenoxide ausgetragen werden. Die festhaftenden Oxidschichten werden durch Beizen mit inhibierter Sulfaminsäure von 2,5% bei einer Temperatur von rd. 60°C in etwa 4 h gelöst. Die Beizlösung wird durch ungefähr die fünffache Menge Wasser verdrängt. Der Kreislauf kann mit Luft getrocknet werden, da der sich hierbei bildende Oxidbelag unbedeutend ist.

Nach dem Füllen des Systems muß der Gasraum des Ausdehnungsbehälters mit Stickstoff sauerstoff-frei gespült werden, da auch Marlotherm® S oxidationsempfindlich ist. Im Temperaturbereich von 100 bis 120°C wird restliches Wasser als Dampf über den Ausdehnungsbehälter ausgeschleust.

Die Wartung von Wärmeträger-Kreisläufen ist im wesentlichen auf das Vermeiden oder Beheben von Undichtigkeiten beschränkt. Oxidationsempfindliche Wärmeübertragungsöle können durch großflächige Verteilung in der Isolierung und bei ausreichendem Luftzutritt – etwa bei beschädigter Blechabdeckung – zu Glühbränden führen. Die Flanschverbindungen sollten deshalb in der Nenndruckstufe 25 mit Nut und Feder ausgeführt werden. Undichte Stopfbüchsen von Absperrarmaturen können während des Betriebes nachverpackt werden, wenn sie mit einer Rückdichtung ausgerüstet sind. Doppelplattenkeilschieber mit Stellite-Sitzflächen haben sich bewährt. Die Gleitringdichtungen der Kreislaufpumpen sollten planmäßig nach 2 Jahren ausgewechselt werden.

Armaturen in Wärmeträgeranlagen

Dipl.-Ing. D. Starke und Ing. V. Stichler, Armaturenfabrik Jos. Strack GmbH, Troisdorf/Köln

Für die Auswahl von Armaturen in Wärmeträger-Anlagen sind die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Wärmeträger bestimmend. Vor allen Dingen ist auf die Dichtheit der Armaturen größter Wert zu legen, da bei Leckagen giftige oder ätzende Substanzen austreten. Außerdem können sich unter gewissen Voraussetzungen explosive Luft/Gas-Gemische bilden, wobei jedoch der Explosionsbereich außerordentlich klein ist und die Zündtemperatur wesentlich höher sein muß als die Betriebstemperatur (etwa 500 bis 600°C).

Aus diesem Grunde ist die Abdichtung des Innenraumes des Ventiles mit Hilfe eines Faltenbalges bei Armaturen für Wärmeträgeranlagen vorteilhaft. Das obere Ende des Faltenbalges, der Faltenbalgteller, wird entweder in Flachdichtungen eingebettet oder häufiger über eine Lippenschweißung mit Gehäuse und Oberteil gasdicht verbunden.

Im übrigen sind für den Betrieb von Wärmeträgeranlagen die Unfallverhütungsvorschriften Druckbehälter zu beachten. Diese Vorschriften schreiben generell die Verwendung von Armaturen ND 25 vor, auch wenn die Anlage praktisch nur mit geringem Druck oder drucklos betrieben wird.

Die Armaturen werden normalerweise über Flanschverbindungen in die Rohrleitungen eingesetzt. Schweißverbindungen sind zwar grundsätzlich möglich, jedoch ist der lösbare Verbindung der Vorzug zu geben. Die Armaturen werden von Hand oder durch motorische (elektrische oder hydraulische) Stellantriebe betätigt.

Anordnung und Betrieb von Notabblase-Systemen

Ing. H. Glomm, John Zink GmbH, Frankfurt/M.

Notabblase-Systeme dienen der schadlosen Beseitigung von Abgasen, welche giftige, geruchsbelästigende oder zündfähige Stoffe enthalten. Sowohl aus sicherheitstechnischen Gründen wie auch zur Reinhaltung der Luft werden in vielen Betrieben Verbrennungssysteme unterhalten, um die bei Betriebsstörung oder beim An- und Abstellen von Anlagen anfallenden oder überschüssigen Gasmengen unschädlich zu machen.

Da in allen diesen Fällen das Gas stoßweise anfällt, ist das Ableitungs-Rohrsystem so auszulegen, daß es genügend schnell die Gase abführen kann, wobei evtl. mitgerissene Flüssigkeitsmengen, Katalysatoren oder andere Feststoffe zu berücksichtigen sind. Weiterhin ist es in vielen Fällen notwendig, außer diesen Abscheidevorrichtungen Wasser- vorlagen als Rückschlagsicherung oder Spüleinrichtungen einzubauen.

Die Abgase können sowohl in speziellen Verbrennungsöfen wie auch durch verschieden angeordnete Fackeln verbrannt werden. Verbrennungsöfen werden vornehmlich dann angewendet, wenn die Abgase schlecht brennfähig sind und erst durch Zumischen von Brenngas oder Brennöl die Verbrennung aufrecht erhalten werden kann. Demgegenüber verlangen Fackeln einen ausreichenden Heizwert der zu verbrennenden Gase. Je nach Zusammensetzung der Abgase können am Boden angeordnete Fackeln oder Hochfackeln verwendet werden, welche insbesondere bei der Verbrennung von Abgasen mit geringem Schwefel oder Chlor von Vorteil sind. Die Verbrennungsluft wird entweder von der Flamme direkt angesaugt oder gegebenenfalls über Dampfstrahl-injektoren eingeblasen, wobei die Dampfzugabe gleichzeitig die Rußbildung unterdrückt. Besondere Sorgfalt ist dem Zündsystem, welches im allgemeinen aus stetig laufenden Pilotbrennern und elektrischen Zündeinrichtungen besteht, zu widmen. [VB 1346]

Umschau

CHEMIE
INGENIEUR
TECHNIK

Umwälzdurchmischung von Flüssigkeiten in Tanks mit großem Länge/Durchmesser-Verhältnis. In Behältern von 10 und 15 cm Durchmesser und 40 bis 100 cm Länge wurden bei variierten Umlaufgeschwindigkeiten die erforderlichen Zeiten bestimmt, die bis zur völligen Durchmischung der im Kreise gepumpten und mit einer Markierungssubstanz (NaCl) versehenen Flüssigkeit (Wasser) notwendig waren. Bei Umwälzmengen von 8 bis 400 l/min wurden Mischzeiten von 0,5 bis 6,7 h gemessen. Auf der Grundlage der Meßergebnisse wurde unter Annahme von Pfropfenströmung eine Rechenmethode zur Bestimmung der Mischzeiten entwickelt, die bei Reynolds-Zahlen über 10000 im Behälter eine Vorausberechnung mit einer Genauigkeit von $\pm 20\%$ erlaubt. Bei niedrigeren Reynolds-Zahlen ergaben sich sehr starke Abweichungen. [U 02600] H. G.

J. E. Harrell, J. R. u. J. J. Perona, Ind. Engng. Chem., Process Des. Dev. 7, 464/68 [1968].

Die Wärmeübertragung in Rohrschlangen wurde analytisch unter Benutzung zahlreicher fremder Experimental-Arbeiten untersucht, und hieraus wurden Gleichungen für die Berechnung des Wärmeüberganges aufgestellt. Bei Strömung von Flüssigkeiten in Rohrschlangen werden der Flüssigkeitsstrom und somit auch der Wärmeübergang Flüssigkeit/Wand von Zentrifugalkräften beeinflusst. Die Strömung kann dabei laminar, laminar mit Makrowirbeln oder auch turbulent sein.

Für laminare Strömung mit Makrowirbeln ist der Wärmeübergang bei Vernachlässigung der Grasshof-Zahl:

$$Nu = 0,0575 Re^{0,33} De^{0,42} Pr^{0,43} (Pr/Pr_w). \quad (1)$$

Diese Gleichung gilt für die Kennzahl $De = Re \sqrt{d/D} = 26$ bis $7 \cdot 10^3$ und $D/d = 6,2$ bis $62,5$. Nu, Re und Pr sind die Kennzahlen von Nußelt, Reynolds und Prandtl bei Flüssigkeitstemperatur. Pr_w ist die Prandtl-Zahl bei Wandtemperatur, d ist der Innendurchmesser des Rohres und D der mittlere Krümmungsdurchmesser der Rohrschlinge. Die größte Abweichung der Meßwerte von Gl. (1) beträgt 20%, 70% aller Meßwerte weichen jedoch von Gl. (1) um weniger als 12% ab.

Für den Wärmeübergang bei turbulenter Strömung und $D/d = 6,2$ bis 104 bei Reynolds-Zahlen bis $6,7 \cdot 10^4$ gilt:

$$Nu = 0,0266 [Re^{0,85} (d/D)^{0,15} + 0,225 (D/d)^{1,55}] Pr^{0,4}. \quad (2)$$

Die größte Abweichung der Meßwerte von Gl. (2) beträgt 25%, aber 75% der Meßwerte weichen von Gl. (2) um weniger als 12% ab. [U 02615] G. S.

W. K. Tschukin, Teploenergetika 16, Nr. 2, S. 50/52 [1969].

Die dynamische Viskosität von Wasserdampf bis 450°C und bis 350 bar untersuchten experimentell Rivkin u. Mitarb. Die Internationale Rahmentafel für Wasserdampf von 1963 enthält keine Angaben über die Viskosität des überhitzten Dampfes auf der Isotherme 350°C, da z. Zt. ihrer Verabschiedung noch keine zuverlässigen Meßwerte bei Temperaturen von 300 bis 375°C vorlagen. Mit einer Versuchseinrichtung, die eine Bestimmung der Viskosität vom Dampf bis 1000 bar bei Temperaturen bis 700°C zuläßt, wurden drei Meßreihen mit insgesamt 127 Meßpunkten im Druck-