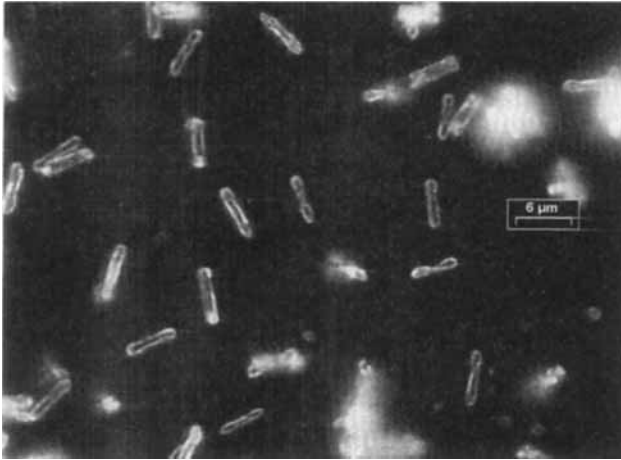


Abbildung 6.
DFM-Aufnahmen von Coffein-Fasern, erzeugt aus der Gasphase.



4 Schlußfolgerungen und Ausblick

Wie aus der Untersuchung der verschiedenen Faserproben hervorgeht, hat sich die DFM in Verbindung mit einer speziellen Probenahmetechnik auf glatten Oberflächen als geeignete Analysenmethode für Fasern im mikronen und submikronen Größenbereich erwiesen. Die Versuche zur eigenen Testfaserherstellung haben ermutigende Ergebnisse erbracht: Zerkleinerte und klassierte Glasfasern können für umfangreiche Tests der DFM und der Bildverarbeitung in hinreichender Menge zur Verfügung gestellt werden.

Bei der Kristallisation aus Lösungstropfen muß noch das Problem der Polydispersität der Partikel überwunden werden. Deshalb wird für weitere Versuchsreihen ein Schwingblendenaerosolgenerator zur Erzeugung der Lösungstropfen eingesetzt. Dieses Gerät liefert monodisperse Tropfen der Größenordnung 1 bis 100 µm Durchmesser. Der Durchmesser der generierten Tropfen ist steuerbar. Wir erwarten nach Verdampfen des Lösungsmittels monodisperse Faserpartikel im angestrebten Größenbereich. Die Fasergröße kann dabei einerseits über die Tropfengröße und andererseits über die Konzentration der Lösung kontrolliert werden.

Parallel zur Kristallisation von Faserpartikeln aus Lösungstropfen wird die Erzeugung aus der Dampfphase weiterverfolgt. Bei dieser Methode ist die gezielte Größensteuerung der entstehenden Fasern schwierig. Trotzdem stellt sie eine echte Alternative dar, da mit dem Verfahren der heterogenen Nukleation aus der Gasphase bisher die geringste Polydispersität der Fasern ohne Klassierung erzielt werden konnte.

Eingegangen am 18. Juni 1999 [K 2574]

Literatur

- [1] DIXKENS, J.; FISSAN, H.
Design of a Sampling System for Off-Line Particle Analysis. in: *Fine Solid Particles*, Shaker Verlag, Aachen 1997, S. 214/222.

- [2] SCHMIDT, F.; SCHMIDT, K. G.; FISSAN, H.
Methods for Detection of Submicron Particles by a Lightmicroscope, *J. Aerosol Sci.* 21 (1990) Suppl. 1, S. 535/538.
- [3] SCHMIDT, F.; DIXKENS, J.; FISSAN, H.
Measurement of Fibrous Particles using Dark Field Microscopy, 7th European Symposium, Partec 98, Nürnberg 1998, S. 685/694.
- [4] CHEN, B. T.; YEH H. C.; JOHNSON N. F.;
Design and Use of a Virtual Impactor and an Electrical Classifier for Generation of Test Fiber Aerosol with Narrow Size Distribution, *J. Aerosol Sci.* 12 (1996) S. 83/94.
- [5] VAUGHAN, N. P.
J. Aerosol Sci. 21 (1990) S. 453/462.

Piezoelektrischer Tropfengenerator zur Kalibrierung von Partikelzählern

HARTMUT ULMKE, THOMAS WRIEDT UND
KLAUS BAUCKHAGE *

1 Problemstellung

In der optischen Partikelmeßtechnik sowie auch in der Aerosolforschung und im Rahmen zahlreicher Meßgeräteentwicklungen werden unterschiedliche Methoden zur Erzeugung und Untersuchung von einzelnen Partikeln und von Partikelkollektiven im unteren Mikrometerbereich eingesetzt. Feinste Partikel dieser Größenordnung können alsdann mit unterschiedlich funktionierenden Levitationseinrichtungen im Meßvolumen laseroptischer Verfahren gehalten werden. So sind zum Beispiel die elektrodynamische Levitation [1] (Teilchengrößen von 1 µm – 100 µm), die magnetische Levitation (Teilchengrößen von 150 µm – 10⁴ µm) oder die Ultraschall-Levitation (Teilchengröße ist vom Material abhängig) im Gebrauch. Partikelseitig ist man insbesondere für die in diesem Größenbereich operierenden Meßgeräte an kugelförmigen Partikeln interessiert, homogen und mit möglichst glatter Oberfläche. Dies kann am einfachsten durch Flüssigkeitstropfen garantiert werden, die im Größenbereich unter 100 µm i.allg. ideal sphärisch sind.

Zur Kalibrierung solcher optischen Partikelgrößenmeßgeräte ist die Verwendung, d. h. Generierung, monodisperser Tropfen mit gleichbleibendem Durchmesser hilfreich. Will man jedoch die exakte Wiedergabe von Partikelgrößenverteilungen mit diesen Geräten überprüfen, so fehlt es bisher an sogenannten Kalibrier-Verteilungen. Sie im unteren Mikrometerbereich aus feinsten Feststoffpartikeln zu präparieren, scheidet angesichts der in diesem Größenbereich wirksamen Kräfte aus: Ein solches „Normal“ würde nicht mehrfach einsetzbar sein, weil stets Teilchen verloren-

* H. ULMKE, Prof. Dr.-Ing. K. BAUCKHAGE, Universität Bremen, FB 4-Verfahrenstechnik, Badgasteiner Straße 3, D-28359 Bremen; Dr.-Ing. T. WRIEDT, Institut für Werkstofftechnik, Badgasteiner Str. 3, D-28359 Bremen.

gehen und die ursprüngliche Partikelgrößenverteilung nie reproduzierbar ist.

Statt dessen ist es hilfreich, eine Reihe von Tropfengeneratoren für diese Aufgabe einzusetzen, die beispielsweise (und idealerweise) Tropfen erzeugen können von 10; 20; 30; 40 μm Durchmesser. Die Zahl der pro Generator erzeugten Tropfen muß vorgebar und überprüfbar sein. Es lassen sich pro Größenklasse beliebig viele Tropfen vorgeben, so daß diese Zahlen pro Größenklasse nacheinander dann auch vom Größenmeßgerät abgefragt und registriert werden können. Auf diese Weise kann man jede Art von Verteilung vorgeben und die Registrierung durch das Meßgerät überprüfen. Dieser Vorgang ist reproduzierbar. Außerdem ist es nebensächlich, ob man exakt jene Durchmesser erzeugt, die gerade die Dekadenschritte angeben oder solche, die mehr oder weniger daneben liegen.

Zur Erzeugung gleich großer Tropfen eignen sich neben elektrostatischen Generatoren [2] auch solche, die ohne dieses Hilfsmittel auskommen und allein aufgrund ihrer Anregungsdynamik winzige Tropfen ausstoßen und die z. B.

- im Überdruckbereich arbeiten (Tropfendurchmesser von 50 μm – 300 μm) oder
- drucklos funktionieren (Tropfendurchmesser von 10 μm – 100 μm).

2 Erzeugung von Tropfen durch Piezo-Tropfengeneratoren

2.1 Tropfengenerator im Überdruckbereich

Wird eine Flüssigkeit mit hohem Druck durch eine Düse gepreßt, so zerfällt der Strahl bei höheren Geschwindigkeiten wellenförmig. Will man gleich große Tropfen erzeugen, wird der Flüssigkeit eine (dominante) Störschwingung aufgebracht, indem z. B. ein den Flüssigkeitskanal konzentrisch umspannendes Piezokeramik-Röhrchen entsprechend angeregt wird und ihn rhythmisch verengt [3]. Während das statische Abtropfen zu einer Durchmesserbeziehung (Tropfen d zur Kanülenöffnung D) führt, die durch die Dichte ρ und die Oberflächenspannung σ der Flüssigkeit sowie die Erdbeschleunigung g wie folgt bestimmt ist:

$$d = \sqrt[3]{6 \sigma D / \rho g} \quad (1)$$

läßt sich die optimale Störfrequenz nach den theoretischen Grundlagen von RAYLEIGH und WEBER errechnen, wobei der Tropfendurchmesser nach [4] in Beziehung zum Düsendurchmesser steht, die sehr vereinfacht (für Wasser) angegeben werden kann als:

$$d \cong 1,9 D \quad (2)$$

Es entsteht eine kontinuierliche Generierung von Tropfen gleichen Durchmessers (Tropfenkette).

Der kontinuierlich arbeitende Tropfengenerator kann auch mit Anregungsfrequenzen außerhalb der optimalen Störfrequenz betrieben werden. Die mit ihm erzielten Ergebnisse, z. B. mit einer Düse von 36 μm (Durchmesser) und Wasser als zu portionierender Flüssigkeit, lieferten im Frequenzbereich von 15 kHz bis 75 kHz Tropfen mit

Durchmessern von 114 μm bis 70 μm . Bei einem (anderen) Langzeitexperiment über 6 Stunden zeigte das zur Tropfenüberwachung eingesetzte Phasen-Doppler-Anemometer für den Tropfendurchmesser von 166 μm eine Standardabweichung von 1,8 μm und für die Tropfengeschwindigkeit von 7,8 m/s eine Standardabweichung von 0,09 m/s, gemessen in der Nähe der Kanülenmündung.

2.2 Druckloser Tropfengenerator

Der drucklos funktionierende Tropfengenerator (drop-on-demand-Verfahren) kommt aus der Tintenstrahl-Drucktechnik. Durch eine Piezokeramik wird in einem mit Flüssigkeit gefüllten Kapillarsystem eine Druckwelle erzeugt und ein Tropfen mit großer Beschleunigung aus einer Düse herausgeschossen [5]. Der Tropfendurchmesser entspricht hierbei dem Düsendurchmesser, ist also kleiner als im Falle des im Überdruckbereich arbeitenden Generators [10].

Indem der im Überdruckbereich arbeitende Generator kontinuierlich Tropfen mit hohen Frequenzen erzeugt, setzt er dabei relativ große Probenmengen durch. Der drucklos funktionierende Tropfengenerator kann je nach Ansteuerung einzelne Tropfen sowie Sequenzen und auch Tropfenketten im kHz-Bereich erzeugen. Die Probenmengen können dadurch bis zu weniger als einem pico-Liter reduziert werden – gleichbedeutend mit extrem genauer Dosiermöglichkeit der Flüssigkeit. Während die Reproduzierbarkeit der Tropfengröße sehr gut ist, besteht andererseits bei offenen Systemen die Gefahr des Zusetzens der Düsenöffnung und des Algenbewuchses, wenn dem nicht gezielt entgegengewirkt wird.

Je nach Anwendungsfall ist der eine Generatortyp dem jeweils anderen vorzuziehen. Für die Erzeugung von Tropfen im Durchmesserbereich $< 50 \mu\text{m}$ und beim Bedarf von Einzeltröpfen sowie bei Dosierungsaufgaben überwiegen die Vorteile des drucklosen Systems.

Die eigene Entwicklung eines drucklosen Tropfengenerators stand unter der Vorgabe, daß für die Untersuchungen mit der Phasen-Doppler-Anemometrie ein Tropfengenerator erforderlich wurde, der über mehrere Stunden Tropfen mit (in engsten Grenzen) gleichbleibenden Durchmessern erzeugt. Für vergleichende Untersuchungen sollten darüber hinaus zehn Durchmesserklassen vorgehalten werden. Das betreffende Gerät sollte leicht zu warten, und die gewünschten Tropfendurchmesser sollten schnell verfügbar sein. Die entstehenden Kosten sollten gering bleiben. Erfahrungen aus der Entwicklung kontinuierlich betriebener Tropfengeneratoren im Überdruckbereich, basierend auf Piezokeramik-Röhrchen, lagen vor.

Die Schritte zum drucklosen Tropfengenerator (zur Erzeugung von Einzeltröpfen und Tropfenketten im kHz-Bereich) werden nachfolgend erläutert.

3 Beschreibung der Einzelkomponenten

3.1 Piezokeramisches Röhrchen

Das piezokeramische Röhrchen [6] hat annähernd auf der gesamten Mantelfläche innen und außen je eine Elektrode.

Beim Anlegen einer elektrischen Spannung zwischen Innen- und Außenelektrode erfolgt sowohl eine Kontraktion des Elementes in Längsrichtung als auch eine Reduzierung des Durchmessers.

Um Tropfen zu erzeugen, wird der Piezokristall mit einem Impuls beaufschlagt. Die Impulsfrequenz gibt die Tropfenfolge an. Da der Piezokristall nicht in Resonanz betrieben wird, muß die Impulsfrequenz so niedrig sein, daß ein Abklingen der durch den Impuls erzeugten Schwingung erfolgen kann. Dadurch ist die obere Frequenz festgelegt. Die Impulsenergie muß dem Tropfenvolumen angepaßt sein und von dem Piezokeramik-Röhrchen über die Kapillare auf die Flüssigkeit übertragen werden. Deshalb ist die mechanische Kopplung des piezokeramischen Röhrchens zur Kapillare von entscheidender Bedeutung. Das verwendete piezokeramische Röhrchen hat einen mechanischen Kopplungsfaktor von 0,6 bei den Abmessungen: Länge = 20 mm, Außendurchmesser = 2,2 mm, Innendurchmesser = 1 mm. Abb. 1 zeigt einen Schnitt durch das piezokeramische Röhrchen mit eingeklebter Kapillare.

3.2 Kapillaren

Es werden Kapillaren [7] aus Borosilicatglas eingesetzt. Der Außendurchmesser beträgt einen Millimeter und ist durch den Innendurchmesser des piezokeramischen Röhrchens vorgegeben. Der Innendurchmesser der Kapillare ist unkritisch und kann innerhalb der Herstellungsgrenzen frei gewählt werden. Als Richtwert kann ein innerer Durchmesser der Kapillare von 0,6 mm angegeben werden.

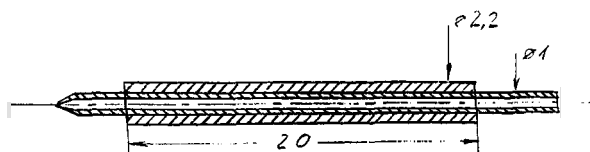
3.2.1 Bearbeitung der Kapillare

Der durch den elektromechanischen Impuls erzeugte Tropfen hat etwa den Durchmesser der Öffnung der Kapillare. Durch Variation der Impulsamplitude ist der Tropfendurchmesser bei diesem Wert mit einer Abweichung von etwa 10 % einstellbar. Um den angenommenen Innendurchmesser der Kapillare von 0,6 mm zu einer Düse von 50 µm zu verjüngen, bieten sich zwei Möglichkeiten an:

- Pullen,
- Schmelzen.

In der Biologie wird für die Fertigung der Mikropipetten der Puller eingesetzt. Die Kapillare wird an den Enden fixiert, über einen Heizdraht in der Mitte erhitzt und dann an den Enden mit Zugkräften beaufschlagt. Mittig verjüngt sich die Kapillare in Abhängigkeit von der zugeführten Heizleistung und den Zugkräften, bis es zu einem gewollten Bruch an der dünnsten Stelle kommt. Nach dem Schleifen der Bruchstelle liegt die Kapillarmündung vor.

Abbildung 1.
Piezokeramisches Röhrchen mit Kapillare.



Ein anderer Weg wird von SWITZER [8] beschrieben. Die Kapillare wird senkrecht über eine weiche Propangasflamme gehalten. Das erhitzte Ende der Kapillare kontrahiert langsam in der Längsrichtung und im Innendurchmesser, während der Außendurchmesser nahezu konstant bleibt. Beobachtet man diesen Vorgang unter dem Mikroskop und handhabt ihn entsprechend, lassen sich auf diese Weise unterschiedliche Düsendurchmesser herstellen. Die Formgebung und eine scharfe Abreißkante an der Stirnfläche der Düse sind entscheidend für die Stabilität der erzeugten Tropfen.

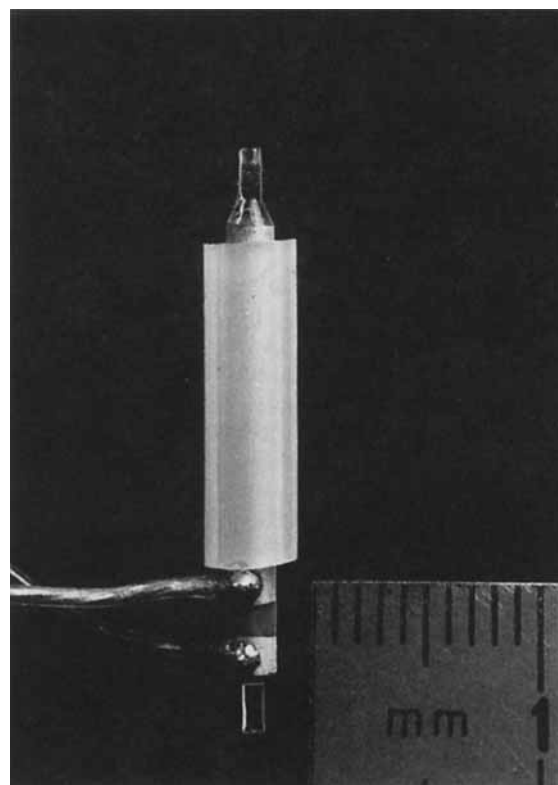
3.2.2 Klebeverbindung des piezokeramischen Röhrchens mit der Kapillare

Die Kapillare soll eine optimale Verbindung mit dem piezokeramischen Röhrchen eingehen. Optimal bedeutet hier:

- bestmögliche mechanische Kopplung,
- thermisch belastbar,
- langzeitstabil.

Als Kleber wird ein Epoxy Zwei-Komponenten-Kleber verwendet [9], z.B. Araldit AY103 und Härter HY991 von CIBA-GEIGY oder EPO-TEK 353ND von POLYTEC. Abb. 2 zeigt ein konfektioniertes piezokeramisches Röhrchen mit Kapillare (PRK), den PTFE-Schutzschlauch und die elektrischen Anschlußdrähte. Der PTFE-Schlauchabschnitt dient zur elektrischen Isolation und schützt das Röhrchen vor mechanischer Beschädigung.

Abbildung 2.
Piezokeramisches Röhrchen mit Kapillare und PTFE-Schutzschlauch.



3.3 Elektronisches Steuergerät

Die Elektronik besteht im wesentlichen aus einem Puls-generator. Die einstellbaren Größen sind:

- Pulsbreite,
- Pulsamplitude,
- Pulsfrequenz.

Für ein stabiles Arbeiten des Gerätes dürfen die einstellbaren Parameter zeitlich nicht driften. Das gilt besonders für die Pulsbreite und die Pulsamplitude. Für die Einstellung der Pulsbreite kann von folgenden Erfahrungswerten ausgegangen werden: Tropfendurchmesser in μm entspricht der Pulsbreite in μs . Die Pulsamplitude ist von der Güte der mechanischen Impulsübertragung abhängig. Auch hier liegen Erfahrungswerte vor: Tropfendurchmesser in μm entspricht der Amplitude in Volt.

3.4 Vorratstank und Halterung des PRK

Mit dem PRK sind dem Anwender recht große Freiheiten für den weiteren mechanischen Aufbau gegeben, da die mechanische Kopplung an eine bestimmte Masse nicht notwendig ist. Es ist nur darauf zu achten, daß die Spitze des PRK mit dem Niveau der Flüssigkeit korrespondiert.

4 Funktionstests und Ergebnisse

Funktionstests wurden mit bidestilliertem Wasser (das über ein 0,2- μm -Filter gereinigt war) vorgenommen.

Mit einer Injektionsspritze wird auf den Vorratstank ein leichter Überdruck gegeben, bis an der Spitze des PRK Flüssigkeit austritt. Die Flüssigkeit sollte mit einem Miniskus in der Spitze der Kapillare stehen.

So vorbereitet kann die voreingestellte Impulsfrequenz eingeschaltet werden. Mit Hilfe einer Halogenlampe kann beobachtet werden, ob eine Tropfenbildung erfolgt. Die einfachste Kontrollmöglichkeit besteht darin, hinter der Kapillare eine Halogenlampe aufzustellen, um die Tropfenkette als Schattenbild, ohne weitere optische Hilfsmittel, sichtbar zu machen.

Abbildung 3.

Geschwindigkeitsverteilung von Tropfenketten; a) 22 μm , b) 51 μm , c) 86 μm .

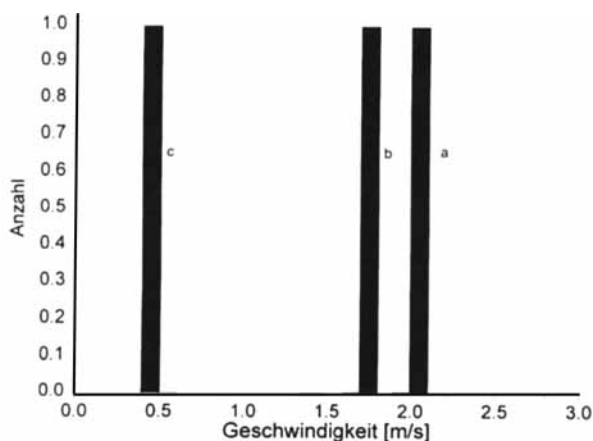
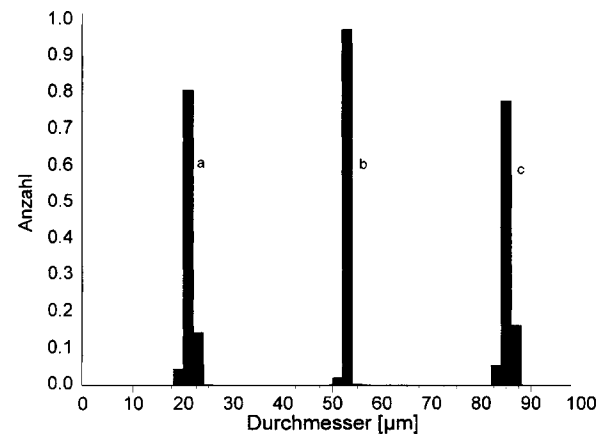


Abbildung 4.

Durchmesserverteilung unterschiedlicher Tropfenketten; a) 22 μm , b) 51 μm , c) 86 μm .



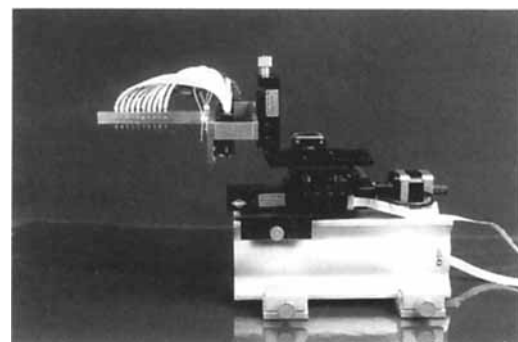
Bei der ersten Inbetriebnahme und zur ständigen Überwachung des Tropfengenerators kann auch ein LED-Stroboskop verwendet werden. Mit einer geringen einstellbaren Verzögerung des Blitzes gegenüber dem Puls auf das piezokeramische Röhrchen läßt sich mit einem Mikroskop gut beobachten, wie Impuls und Amplitude mit unterschiedlichen Einstellungen zur Tropfenbildung führen. Die Tropfengeschwindigkeit kann mit der Amplitude in (engen) Grenzen eingestellt werden. Wird die Amplitude zu sehr erhöht, entstehen Satellitentropfen.

Mit Hilfe eines Phasen-Doppler-Anemometers wurden die Geschwindigkeits- und Durchmesser-Anzahlverteilungen einer 22 μm , 51 μm und 86 μm im Durchmesser betragenden Tropfenkette (jeweils 10 000 Ereignisse bei 50 Hz Tropfenfolge) gemessen. Abb. 3 zeigt die Geschwindigkeits-Anzahlverteilung. Die geringe Breite der Geschwindigkeitsverteilung weist auf die Stabilität des Systems hin. Für viele Anwendungen, z. B. als Referenz, zur Kalibrierung oder zur Dosierung, ist die Standardabweichung des Tropfendurchmessers die entscheidende Größe. In diesem Sinne zeigt die Abb. 4 entsprechende Durchmesser-Anzahlverteilungen. Wie aus den Diagrammen zu entnehmen ist, liegt eine geringe Standardabweichung vor: Diagramm a) 0,7 μm , Diagramm b) 0,4 μm , c) 0,8 μm , so daß von einem sehr genauen Referenzverfahren gesprochen werden kann.

Für alle Messungen wurde der Tropfengenerator mit bidestilliertem Wasser gefüllt. Durch den offenen Auf-

Abbildung 5.

Zehnfach-Kopf mit Schrittmotorsteuerung.



bau des Gerätes ist eine Umstellung auf einen anderen Tropfendurchmesser leicht möglich und eine Verstopfung des PRK einfach zu beseitigen. Außer Wasser wurden auch andere Flüssigkeiten mit unterschiedlichen Viskositäten und Oberflächenspannungen zertropft, z. B. Glycerin (bis zu 86 Gew.-%), DMSO, Nitro.

Das in der Einleitung beschriebene Entwicklungsziel, mit z. B. zehn Tropfengeneratoren unterschiedliche Verteilungen vorgeben zu können, wurde erreicht. Das Rechner-gesteuerte System ist erprobt. Abb. 5 zeigt den Zehnfach-Kopf mit der Schrittmotorsteuerung.

5 Schlußfolgerung

Es wurde ein drucklos arbeitender Tropfengenerator entwickelt und getestet, der gekennzeichnet ist durch:

- Tropfendurchmesser-Bereiche von 10 µm bis 100 µm,
- Tropfenfolgen vom Einzeltropfen bis zur Tropfenkette von 3 kHz,
- gute Langzeitstabilität des Tropfendurchmessers und der Tropfengeschwindigkeit.

Das Gerät ist schnell auf unterschiedliche Tropfendurchmesser umzurüsten. Die Reinigung der Kapillaren ist problemlos zu erreichen, dadurch resultieren eine hohe Verfügbarkeit des Gerätes und geringe laufende Kosten.

Eingegangen am 7. Juli 1999 [K 2580]

Literatur

- [1] GÖBEL G. Größen- und Eigenschaftsbestimmung elektro-dynamisch levitierter Partikel (< 100 µm), Dissertation, Universität Bremen 1998.
- [2] WIGGERS H.; WALZEL P. Elektrostatisches Zerstäuben von Flüssigkeiten, Chem.-Ing.-Tech. 69 (1997) S. 1066/1073.
- [3] MANASSE, U. Erweiterung der Phasen-Doppler-Anemometrie auf optisch absorbierende Flüssigkeiten, Fachbereich 4, Verfahrenstechnik, Universität Bremen 1993.
- [4] DÖKING, TH. Entwurf eines miniaturisierten Tropfengenerators zur Erzeugung von Tropfen gleicher Größe und Geschwindigkeit, Institut für Thermo- und Fluid-dynamik, Ruhr-Universität Bochum 1990.
- [5] DÖRING, M. Flüssigkeiten mikrofein dosieren, Feinwerktechnik und Meßtechnik, Carl Hanser Verlag, München 1991.
- [6] PI-CERAMIC GMBH, D-07589 Lederhose.
- [7] HILGENBERG GMBH, D-34321 Malsfeld.
- [8] SWITZER, G. I. A Versatile System for Stable Generation of Uniform Droplets, Rev. Sci. Instrum. 62 (1991) 11, S. 2765/2771.
- [9] CIBA-GEIGY GmbH, D-79662 Wehr/Baden.
- [10] ULMKE, H.; WRIEDT, T.; LOHNER, H.; BAUCKHAGE, K. The Piezoelectric Droplet Generator – A Versatile Tool for Dispensing Applications and Calibration of Particle Sizing Instruments (PAT MCKEOWN et al. Ed.), Precision Engineering – Nanotechnology, Proceedings of the 1st International Euspen Conference, Vol. 2, Shaker Verlag, Aachen 1999, pp. 290/293.

Verminderung der Foulingschichtbildung auf Wärmeübertragungsflächen*

MARKUS FÖRSTER, WOLFGANG AUGUSTIN UND
MATTHIAS BOHNET **

1 Grundgedanken

Beim Einsatz von Wärmetauschern, insbesondere in der chemischen und pharmazeutischen sowie der Lebensmittelindustrie, tritt häufig das Problem der Ausbildung kristalliner Ablagerungen (Fouling) auf [1-5]. Die Foulingschichten führen zu einem deutlichen Anstieg des Wärmedurchgangswiderstandes und erhöhen damit vor allem die Investitions-, Betriebs- und Wartungskosten. Neuere Maßnahmen, der Belagbildung auf Wärmeübertragungsflächen entgegenzuwirken, setzen auf eine gezielte Beeinflussung der sog. Induktionsphase. Diese Phase geht dem eigentlichen Foulingvorgang voran und ist durch das Anhaften der ersten Kristalle an der Wärmeübertragungsfläche und deren Zusammenschluß zu einer kompakten Foulingschicht gekennzeichnet. Es wurden zwei Methoden zur Verlängerung der Induktionsphase und der damit verbundenen Reduzierung der Foulingkosten untersucht:

1. gezielte Beeinflussung der Grenzflächeneigenschaften Kristall/Wärmeübertrager zur Verringerung der Haftfestigkeit der Kristalle;
2. Erhöhung der Schubbeanspruchung der Kristalle durch geeignete hydrodynamische Strömungsführung.

Erfolgreiche Anti-Fouling-Strategien bauen auf die Kombination beider Maßnahmen. Für einen erfolgreichen Kristallabtrag muß die durch die Flüssigkeit auf die Kristalle ausgeübte Schubbeanspruchung diejenigen Kräfte überschreiten, die durch die Adhäsionseigenschaften gekennzeichnet sind.

2 Beeinflussung der Grenzflächeneigenschaften Kristall/Wärmeübertrager

2.1 Foulingversuche

Zur Variierung der Adhäsionseigenschaften an der Grenzfläche Kristall/Wärmeübertrager wurden die grenzflächenenergetischen Eigenschaften modifiziert. Dies wurde durch den Einsatz verschiedener Wärmeübertragungsmaterialien in einem Plattenwärmeübertrager erreicht. Als Maß für die verschmutzungsbedingte Zunahme des Wärmedurchgangswiderstandes durch die kristalline Ablagerung dient der Foulingwiderstand¹⁾:

* Vortrag auf der GVC-Fachaussschußsitzung „Wärme- und Stoffübertragung“, 3. März 1999 in Bad Kissingen.

** Dipl.-Ing. M. FÖRSTER, Dr.-Ing. W. AUGUSTIN, Prof. Dr.-Ing. M. BOHNET, Institut für Verfahrens- und Kerntechnik, TU Braunschweig, D-38106 Braunschweig.

1) Eine Zusammenstellung der Formelzeichen befindet sich am Schluß des Beitrags.