

Nicht-invasive experimentelle Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern in Spiralstrahlmühlen

Non-invasive experimental determination of velocity fields in spiral jet mills

Bartholomäus Luczak^{1,2,3}, Rolf Müller¹, Mathias Ulbricht², Heyko-Jürgen Schultz³

¹ LANXESS Deutschland GmbH, Kennedyplatz 1, 50569 Köln

² Universität Duisburg-Essen, Lehrstuhl für Technische Chemie II, Universitätsstr. 7, 45141 Essen

³ Hochschule Niederrhein, Fachbereich 01 Chemie, Technische Chemie, Adlerstr. 32, 47798 Krefeld

Mahlung, Strahlmühle, Particle Image Velocimetry, PIV, Strömungsverhältnisse
Milling, grinding, jet mill, Particle Image Velocimetry, PIV, flow conditions

Zusammenfassung

Sehr viele Parameter, die die Mahlung in Spiralstrahlmühlen beeinflussen, wurden bereits eingehend erforscht. Dennoch liegen keine Untersuchungen zum Einfluss mehrerer Kenngrößen auf die Strömungsbedingungen über den gesamten Querschnitt innerhalb der Spiralstrahlmühle mittels nicht-invasiver Methoden vor. Ein neuartiger Modellmühlen-Prüfstand wurde hierfür eigens entwickelt und in Betrieb genommen. Dieser ist hochgradig modular aufgebaut und ermöglicht somit eine sehr schnelle und handliche Änderung der operativen und geometrischen Parameter. Dank seiner nahezu vollständigen optischen Zugänglichkeit wird eine nicht-invasive experimentelle Bestimmung der Strömungsbedingungen innerhalb der Mühle ermöglicht. Dieser Beitrag beschreibt die Messanordnung des neuartigen Strahlmühlen-Prüfstands sowie erste experimentell ermittelte Strömungsfelder innerhalb der Spiralstrahlmühle.

Abstract

The effects of several parameters on the flow conditions over the entire cross-section inside the spiral jet mill have not yet been studied via non-invasive methods although there are numerous investigations of most of the characteristic variables affecting the spiral jet milling. A new type of experimental spiral jet mill test rig was designed and constructed in order to vary several geometrical and operative parameters and to determine the flow conditions inside the jet mill. Its highly modular construction enables a very convenient variation of the geometric and operative parameters. The experimental apparatus has an almost entire optical accessibility and therefore a non-invasive experimental determination of the flow conditions inside the jet mill is possible. This paper describes the set-up of the new type of mill apparatus as well as preliminary experimental results concerning the flow conditions inside the spiral jet mill.

Einleitung

Nach ersten orientierenden und beschreibenden Untersuchungen (Rumpf/1 1960) wurde die Spiralstrahlmahlung eingehend erforscht. In weiteren Studien (Rumpf/2 1960, Kürten und Rumpf/1 1966, Muschelknautz 1970) wurden die Strömungsbedingungen sowie die Zerkleinerung innerhalb der Spiralstrahlmühle mittels Tribolumineszenz untersucht. Dabei emittiert z.B. Mangan-aktiviertes Zinksulfid während der Bruchfortpflanzung Licht, sodass die Stellen lokalisiert werden können, an denen Zerkleinerung auftritt. Als Zerkleinerungsbereich wurde in diesen Arbeiten zum größten Teil die Rückseite der Mahlstrahlen beschrieben. Eine weitere Untersuchungsmöglichkeit zeigten Kürten und Rumpf auf, als sie die Strömungsbedingungen in einer mit Wasser gefüllten Spiralstrahlmühle mit Tinte visualisierten (Kürten und Rumpf/2 1966). Außerdem untersuchten sie den Strömungsverlauf in Wandnähe mit der Rußmethode von Euteneuer. Müller et al. filmten den Zerkleinerungsprozess in einer Spiralstrahlmühle mit Glas-Boden (Müller et al. 1996), während Bauer die meisten der oben erwähnten Methoden zusammenführte (Bauer 1999). Er arbeitete mit Tribolumineszenz, Tinten-Tropfen am Boden der Spiralstrahlmühle sowie Video-Aufnahmen des Zerkleinerungsprozesses in einer Spiralstrahlmühle mit Glas-Boden. Die Bereiche um den Produktein- und -austrag in der Spiralstrahlmühle wurden von Katz und Kalman durch einen transparenten Deckel visualisiert (Katz und Kalman 2007), während einige Untersuchungen mit Pitot-Rohren als invasive Methode zur Ermittlung von Geschwindigkeitsfeldern innerhalb der Mühle bekannt sind (siehe Hagendorf 2006).

Spiralstrahlmühlen werden bis heute häufig in der Industrie eingesetzt um Partikeldurchmesser im einstelligen Mikrometer-Bereich zu erreichen, wie zum Beispiel in der Mahlung mikronisierter Eisenoxidpigmente wie Magnetit, Hämatit und Goethit. Trotz ihres relativ hohen Energieverbrauchs ist der Einsatz von Spiralstrahlmühlen gerechtfertigt und teilweise sogar alternativlos: Fluide können durch Düsen auf 500 bis 600 m/s beschleunigt werden, wohingegen diese Geschwindigkeiten mit bewegten Mahlwerkzeugen aus Gründen der Materialfestigkeit nicht erreicht werden können. Das Fehlen der bewegten Mahlwerkzeuge führt zudem dazu, dass keine Verunreinigungen durch Abrieb der Mahlwerkzeuge im Produkt zu befürchten sind.

Für die in diesem Beitrag beschriebenen Untersuchungen wurde ein neuartiger Modellmühlen-Prüfstand entwickelt, konstruiert und in Betrieb genommen, der durch seine annähernd vollständige optische Zugänglichkeit die Ermittlung von Geschwindigkeitsfeldern über den gesamten Querschnitt innerhalb der Mühle mittels nicht-invasiver Methoden ermöglicht. Durch seinen höchst modularen Aufbau können die operativen aber auch geometrischen Parameter ohne großen Aufwand verändert und somit deren Einfluss auf die Strömungsbedingungen untersucht werden. Bei den nicht-invasiven, optischen Methoden wird die Particle Image Velocimetry (PIV) dabei besonders fokussiert, da diese in der Arbeitsgruppe um Prof. Schultz bereits in zahlreichen Forschungsprojekten (siehe Bliem und Schultz 2014, Luczak et al. 2016, Jährling et al. 2017) zur Untersuchung von Strömungsbedingungen und Mischprozessen in diversen Systemen und Umgebungen erfolgreich eingesetzt wurde.

Experimenteller Aufbau

In der ersten Phase des Forschungsprojektes stand die Entwicklung, Konstruktion und Inbetriebnahme eines neuartigen Modellmühlen-Prüfstands im Vordergrund, der eine nicht-invasive Ermittlung von Geschwindigkeitsfeldern innerhalb der Spiralstrahlmühle ermöglichen sollte. Um die Strömungsbedingungen nicht nur mittels Hochgeschwindigkeitskameras sondern auch mittels PIV untersuchen zu können, war eine mindestens zweifache optische

Zugänglichkeit des Prüfstands notwendig. Dabei musste sowohl die Platzierung des LASER-Lichtschnitts innerhalb der Mühle als auch die Beobachtung der beleuchteten Partikel im rechten Winkel hierzu ermöglicht werden. Hierbei wurden sowohl die Boden- und Deckelplatten als auch der zylindrische Mahlring aus Polymethylmethacrylat (PMMA) gefertigt. Weiterhin musste der üblicherweise vorhandene Mahlgasraum, der die seitliche optische Zugänglichkeit des Mahlraumes erheblich beeinträchtigt hätte, entkoppelt werden. Lediglich die benötigte Anzahl an Mahldüsen wurde direkt an dem zylindrischen Mahlraum angebracht und per flexibler Druckluftleitung mit der modularen und gekoppelten Ringleitung verbunden. Mittels einer praktischen Schraub-/Dichtungstechnik kann der Prüfstand ohne dauerhafte Befestigungen oder Verklebungen abgedichtet werden, was zusammen mit dem modularen Aufbau die Flexibilität des Prüfstands massiv erhöht. Die Boden- und Deckelplatten verfügen über eine exakte Nut für den zylindrischen Mahlring sowie passende O-Ring-Dichtungen. Mittels Inbusschrauben wird die Deckelplatte gegen die massive Stahl-Grundplatte verschraubt, wobei durch den dazwischen liegenden Mahlring, die O-Ring-Dichtungen und die Bodenplatte der gesamte Aufbau dichtend zusammengepresst wird. Um eine Verformung der Boden- und Deckelplatten aufgrund der Verschraubungen zu vermeiden, werden diese aus massiven, 20 mm dicken PMMA-Scheiben geschnitten (siehe Luczak et al. 2016).

Der Durchmesser des Mahlraums wurde mit 190 mm in der Größenordnung einschlägiger Literatur gewählt (siehe Müller et al. 1996, Katz und Kalman 2007, Gommeren et al. 2000). Die massive Grundplatte hat eine kreisrunde Aussparung mit 200 mm Durchmesser mittig unter dem Prüfstand, sodass die Strömungsbedingungen innerhalb der Modellmühle durch die PMMA-Boden-Platte beobachtet werden können (Luczak et al. 2016). Für den Fall einer zu starken Abrasion diverser Mahlprodukte im Inneren des Modellmühlen-Prüfstands und somit einer Einschränkung der optischen Zugänglichkeit, wurde ein kreisrundes Floatglas mit 1 mm Dicke geschnitten, welches exakt in den kreisrunden Mahlraum-Boden auf die PMMA-Bodenplatte gelegt werden und somit als Abrasionsschutz dienen kann. Bei geforderter gleichbleibender Höhe des Mahlraums kann die Nut in der Boden-Platte um die Dicke des Floatglases reduziert werden. Dies wird an der CNC-Fräse variabel umgesetzt. Abbildung 1 zeigt den Hauptteil des Modell-Mühlen-Prüfstands.

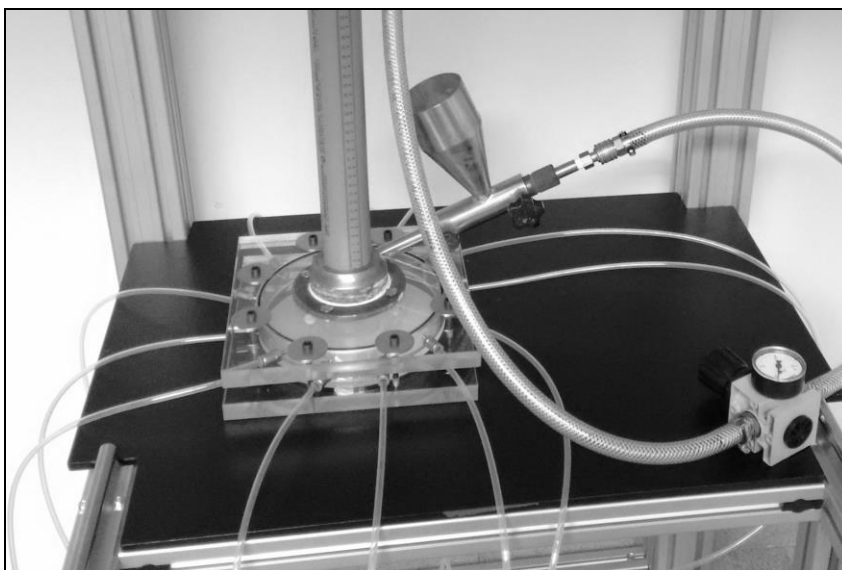


Abb. 1 Spiralstrahlmühlen-Prüfstand zur nicht-invasiven Untersuchung der Strömungsverhältnisse innerhalb der Mühle

Die Ringleitung mit modularem Kopplungssystem, die Schraub-/Dichtungstechnik sowie mehrere zylindrische Mahlringe mit unterschiedlichen Höhen, Düsen-Anordnungen, Düsen-Geometrien sowie unterschiedlicher Düsen-Anzahl auf Vorrat, ermöglichen eine Variation der geometrischen Parameter in wenigen Handgriffen. Weiterhin kann auch die Injektor-Düse in ihrer Geometrie und Position und mit Druckminderern die Injektor- und Mahlgas-Drücke sowie die jeweiligen Massenströme variiert werden. Das Aufgabegut wird mittels Schüttelrinne VIBRI der Firma Sympatec GmbH in den Aufgabetrichter dosiert, als Aufgabegut wird Bariumsulfat (Lieferant: Krockow GmbH) mit einer Mohs-Härte von etwa 3,3 (siehe Hirschberg 1999) und einem Median-Partikeldurchmesser $x_{50,3}$ von 10,9 μm genutzt. Der Strömungsvorgang im Inneren des Modellmühlen-Prüfstands kann dank der neuartigen Konstruktion illuminiert sowie mittels Kamera beobachtet und aufgenommen werden. Der Laserlichtschnitt wird von einem Nd:Yag LASER mit einer Wellenlänge von 532 nm, DualPower 135-15 der Firma Dantec Dynamics GmbH generiert. Mittels einer FlowSenseEO 4M Kamera mit vier Millionen Pixeln der Firma Dyttec Dynamics wird die Beobachtungsebene durch die Boden-Platte aus PMMA aufgenommen. Die LASER-Pulse und Kamera-Aufnahmen werden mit einer 80N77 Timer Box getriggert.

Im Betrieb wird das Aufgabegut in den Aufgabetrichter dosiert, mittels des Injektorgases beschleunigt und in das Mahlrauminnere der Spiralstrahlmühle befördert. Die schräg angeordneten und gleichmäßig am Umfang des zylindrischen Mahlrings verteilten Mahldüsen erzeugen eine Spiralströmung im Inneren des Mahlraums. Autogene Zerkleinerung führt zur Vermahlung der zugeführten Partikel, die durch das zentrierte Produkt-Austrags-Rohr die Mühle nach oben hin verlassen. Größere Partikel verbleiben in den äußeren Bereichen des Mahlraums, bis sie durch Partikel-Partikel-Zusammenstöße hinreichend zerkleinert und ebenfalls über das zentrierte Austragsrohr aus der Mühle ausgetragen werden. Eine Schnittzeichnung des Prüfstands aus der Seitenansicht, mit Aufgabegut-Eintrag, Produkt-Austrags-Steigrohr, dem LASER und Kamera sowie dem Grundkörperaufbau zeigt Abbildung 2.

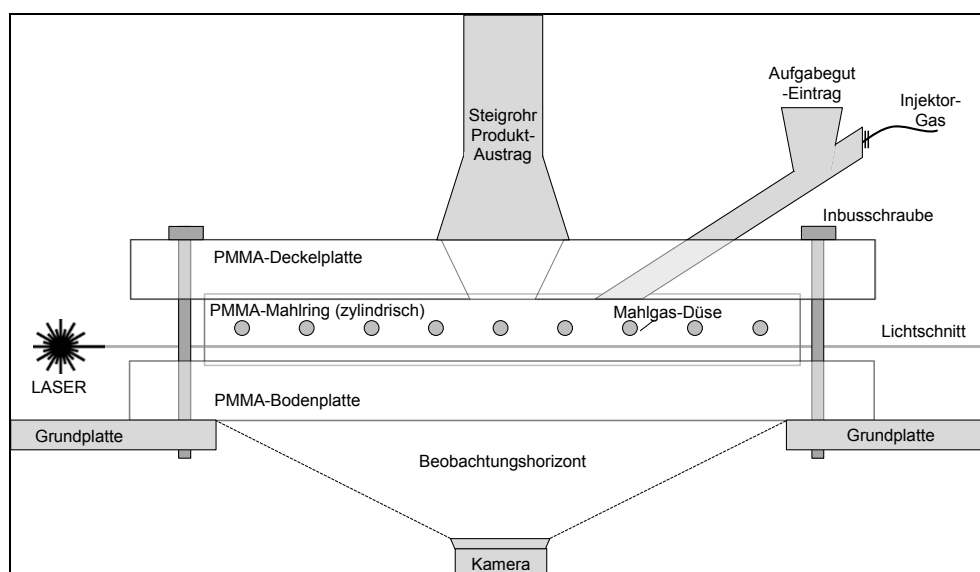


Abb. 2 Schnittzeichnung Modellmühlen-Prüfstand aus Seitenansicht

Ergebnisse und Diskussion

Nach Entwicklung, Konstruktion und Inbetriebnahme des neuartigen Spiralstrahlmühlen-Prüfstands wurden erste orientierende PIV-Messungen durchgeführt. Der horizontale LASER-Lichtschnitt kann über, unter oder auf Höhe der Mahldüsen positioniert werden. Erste Messungen wurden an einer Modellmühle mit einer Mahlraum-Höhe von 19 mm und acht schräg angeordneten Mahldüsen durchgeführt. Der Mahlgas-Druck betrug 6,1 bar, bei einem Volumenstrom von etwa 200 L/min. Die Düsen wiesen einen Auslass-Durchmesser von 0,6 mm auf und wurden gleichmäßig auf mittlerer Höhe über den Umfang des zylindrischen Mahlrings verteilt. Der Winkel der Mahlgas-Düsen betrug 70 °C zur Tangente und der LASER-Lichtschnitt befand sich 5 mm über der Boden-Platte. Die Austrittsgeschwindigkeit des Gases am Düsenaustritt war in diesem Fall bei Schallgeschwindigkeit limitiert, da zylindrisch-konvergente Düsen eingesetzt wurden. Es wurde mit einer Trigger Rate von 8,534 Hz getriggert, die Zeit zwischen den LASER-Pulsen betrug 7,0 μ s. Das Geschwindigkeitsfeld über den gesamten Querschnitt innerhalb der Mühle zeigt Abbildung 3.

Diese ersten orientierenden Messungen zeigen auf, dass Geschwindigkeitsfelder innerhalb der Mühle mit nicht-invasiven Methoden bestimmt werden können. Es darf jedoch in diesem Zusammenhang nicht unerwähnt bleiben, dass bei diesen Messungen kein Produkt-Austrag aus der Mühle beobachtet werden konnte und somit die Dosierung des Aufgabeguts nach einigen Sekunden abgebrochen werden musste. Dies erklärt, warum die Partikel-Geschwindigkeiten nicht wie erwartet in Richtung des Produkt-Austrags steigen und zum Produkt-Austrag hin sogar nicht mehr signifikant ermittelt werden können. Dennoch entsprechen die maximalen Partikel-Geschwindigkeiten am äußeren Rand des Mahlraums anderen Forschungsergebnissen. Rumpf untersuchte das Beschleunigungsverhalten von Partikeln mit unterschiedlichen Durchmessern in Einzelstrahlen mittels Stroboskop und ermittelte Partikel-Geschwindigkeiten von 30 bis 80 m/s bei Strahlgeschwindigkeiten von 282 m/s (Rumpf/2 1960). Die Untersuchungen mit Pitot-Rohren an einer Spiralstrahlmühle (Hagendorf 2006) ergaben ebenfalls Partikel-Geschwindigkeiten von etwa 50 m/s in den äußeren Bereichen des Mahlraums (Mahlgas-Druck 4,0 bar, Mühlendurchmesser 80 mm, fünf Düsen á 0,7 mm).

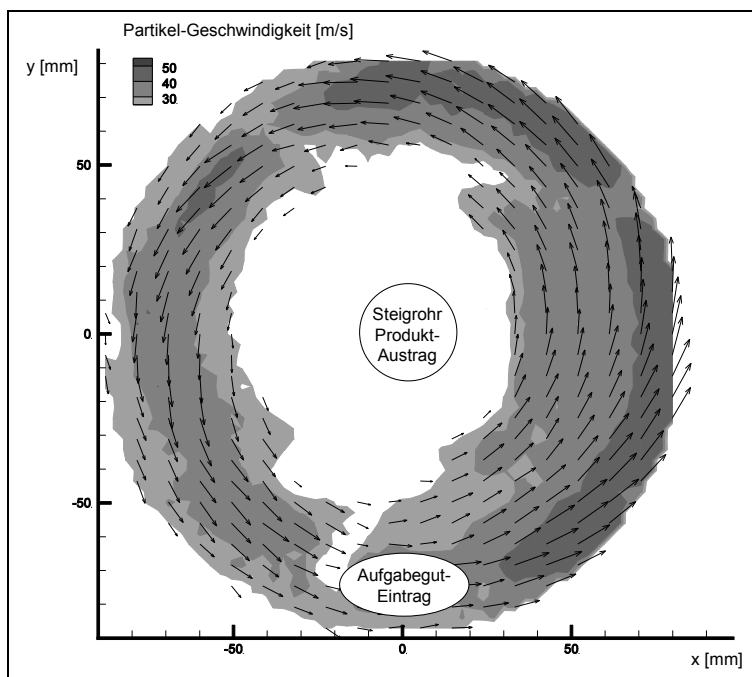


Abb. 3 Geschwindigkeitsfeld über den Querschnitt innerhalb der Mühle

Zusammenfassung und Ausblick

Ein neuartiger Spiralstrahlmühlen-Prüfstand mit nahezu vollständiger optischer Zugänglichkeit wurde entwickelt, konstruiert und in Betrieb genommen. Der Prüfstand wurde im Hinblick auf nicht-invasive Untersuchungen der Strömungsverhältnisse über den gesamten Querschnitt innerhalb der Mühle entwickelt. Durch einen modularen Aufbau sowie eine handliche Schraub-/Dichtungstechnik ohne dauerhafte Befestigungen oder Verklebungen lassen sich nicht nur die operativen sondern auch die geometrischen Parameter ohne viele Handgriffe variieren. PIV-Untersuchungen bestätigen die Möglichkeit, plausible Partikel-Trajektorien und -Geschwindigkeiten zu ermitteln. Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme des Prüfstands sowie des PIV-Messsystems wird der Fokus darauf gelegt, die Strömungsbedingungen innerhalb der Spiralstrahlmühle bei möglichst weitreichender Variation der operativen und geometrischen Parameter zu untersuchen. Dabei soll insbesondere die Düsen-Anzahl, -Geometrie und -Verteilung aber auch der Winkel der Düsen sowie die Massenströme des Aufgabeguts und des Gases verändert werden.

Bislang wurden die PIV-Untersuchungen anhand der systembedingt in der Strahlmühle vorhandenen Mahlpartikel durchgeführt. Diese dienen dabei weniger als „Tracer“ sondern mehr als „Object of Interest“. Die Mahlpartikel sollen nicht, wie gewohnt gefordert, der Luft möglichst schlupffrei folgen, sondern allein die durch die Luftströmung beeinflusste Partikelbewegung wird erfasst. Ergänzend zu diesen Untersuchungen werden in der Folge im Forschungsprojekt auch tatsächliche „Tracer“ eingesetzt, die der Luftströmung möglichst schlupffrei folgen sollen. Hierbei wird ein Diethyl-Hexyl-Sebacat (DEHS) -Seedinggenerator der Firma Dantec Dynamics GmbH ohne Eintrag des Aufgabeguts eingesetzt. Insbesondere die Untersuchung der Störung der durch die Mahldüsen hervorgerufenen Spiralströmung durch das von oben einströmende Injektorgas soll unter verschiedenen Bedingungen untersucht und somit Rückschlüsse auf die partikelbeladenen Strömungen gezogen werden.

Die Verbindung der Geschwindigkeitsfelder der Mahlpartikel sowie der getracerten Luftströmung mit ständig durchgeführten Qualitätsanalysen des Mahlprodukts ermöglicht eine gute Aussage über die Strömungsbedingungen und Mahleffizienz der einzelnen Parameter-Konfigurationen. Hierdurch soll, unter ständigem Abgleich mit dem Industrie-Referenzprozess, ein Erkenntnisgewinn über den Einfluss der einzelnen Parameter auf die Spiralstrahlmahlung generiert und somit direkte Optimierungsmöglichkeiten abgeleitet werden – sowohl im Hinblick auf die Energieeffizienz, als auch im Hinblick auf das Mahlergebnis.

Literatur

Rumpf, H., 1960/1: „Prinzipien der Prallzerkleinerung und ihre Anwendung bei der Strahlmahlung“, Chem. Ing. Tech., Vol. 32, No. 3, pp. 129-137

Rumpf, H., 1960/2: „Versuche zur Bestimmung der Teilchenbewegung in Gasstrahlen und des Beanspruchungsmechanismus in Strahlmühlen“, Chem. Ing. Tech., Vol. 32, No. 5, pp. 335-343

Kürten, H., Rumpf, H., 1966/1: „Zerkleinerungsuntersuchungen mit tribolumineszierenden Stoffen“, Chem. Ing. Tech., Vol. 38, No. 3, pp. 331-342

Muschelknautz, E., Giersiepen, G., Rink, N., 1970: „Strömungsvorgänge bei der Zerkleinerung in Strahlmühlen“, Chem. Ing. Tech., Vol. 42, No. 1, pp. 6-15

Kürten, H., Rumpf, H., 1966/2: „Strömungsverlauf und Zerkleinerungsbedingungen in der Spiralstrahlmühle“, Chem. Ing. Tech., Vol. 38, No. 11, pp. 1187-1192

Luczak, B., Müller, R., Schultz, H.J., 2016: „Untersuchungen zu Einflüssen auf die Strömungsverhältnisse und das Mahlergebnis in Spiralstrahlmühlen mittels Particle Image Velocimetry (PIV)“, Chem. Ing. Tech., Vol. 88, No. 9, 1362-1363

- Müller, F., Polke R., Schädel, G., 1996:** "Spiral jet mills: hold up and scale up", Int. J. Miner. Process., Vol. 44-45, pp. 315-326
- Bauer, V., 1999:** "Experimentelle und theoretische Betrachtungen der Strömungsverläufe in Bezug auf die Sichtwirkung und die Zerkleinerungsvorgänge in Spiralstrahlmühlen", Fortschritt-Berichte VDI, Vol. 3, No. 589, Düsseldorf
- Katz, A., Kalman, H., 2007:** "Preliminary experimental analysis of a spiral jet mill performance", Part. Part. Syst. Charact., Vol. 24, pp. 332-338
- Hagendorf, A., 2006:** "Untersuchungen zum Strömungsverhalten in einer Spiralstrahlmühle mittels Druckmessungen", Dissertation, Würzburg, 2006
- Bliem, V., Schultz, H.J., 2014:** "Investigation of Horizontal Velocity Fields in Stirred Vessels with Helical Coils by PIV", Int. J. Chem. Eng., No. 2014
- Jährling, K., Wolinski, S., Stefan, A., Helle, H., Bliem, V., Ulbricht, M., Schultz, H.J., 2017:** "Particle Image Velocimetry Compared to CFD Simulation of Stirred Vessels with Helical Coils", Chem. Ing. Tech, Vol. 89, No. 4, pp. 401-408
- Gommeren, H.J.C., Heitzmann, D.A., Moolenaar, J.A.C., Scarlett, B., 2000:** "Modelling and control of a jet mill plant", Powder Technol., Vol. 108, pp. 147-154
- Hirschberg, H.G., 1999:** "Handbuch Verfahrenstechnik und Anlagenbau", Vol. 1, Springer, Berlin