

Energie- und ressourcenschonende Sprühtrocknung von hochviskosen Flüssigkeiten mittels Air-Core-Liquid-Ring (ACLR) Zerstäubung

Unsere Autoren: **M. O. Wittner, H. P. Schuchmann, V. Gaukel**, Karlsruher Institut für Technologie, Lebensmittelverfahrenstechnik, Karlsruhe

Die Sprühtrocknung ist ein weitverbreitetes Verfahren zur Erzeugung von pulverförmigen Produkten aus flüssigen Ausgangsstoffen, mit dem Hauptziel einer verbesserten Haltbarkeit. Das Sprühtrocknungsverfahren kann in drei Hauptschritte unterteilt werden: Die Zerstäubung in feine Tropfen, die konvektive Trocknung in einem Heißluftstrom und die Pulverabscheidung^[1]. Die Zerstäubung ist dabei der Verfahrensschritt, der über die erzeugte Sprühtropfengrößenverteilung alle nachfolgenden Prozessschritte entscheidend beeinflusst. So trocknen kleinere Partikel aufgrund ihres höheren Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnisses schneller als größere. Dadurch können in einem Sprühtrockner bei Vorliegen von ungünstigen, breiten Tropfengrößenverteilungen, zu kleine Partikel verbrennen, während zu große Partikel nicht ausreichend trocknen. Letzteres führt zu erhöhter Klebrigkeit der Partikel, Pulveranhaftungen in den Prozessanlagen und Lagerungsproblemen^[2]. Im Vergleich zu anderen Trocknungsverfahren sind die größten Nachteile der Sprühtrocknung der hohe Energiebedarf und der große apparative Aufwand bei hohen Durchsätzen. In der industriellen Anwendung wird daher angestrebt, die zu trocknenden Medien dem Trocknungsprozess mit einem möglichst niedrigen Wassergehalt (hoher Trockenmasse) zuzuführen^[3]. Dies ist günstiger, da zum einen für die vorgeschaltete Aufkonzentration energiesparendere Metho-

den, wie Membranprozesse oder mehrstufige Eindampfung eingesetzt werden können, zum anderen kann bei einer konstanten Wasserverdampfungsrate ein höherer Produktdurchsatz realisiert werden. Allerdings kann der Trockenmassegehalt nicht beliebig erhöht werden, da mit steigender Aufkonzentration auch die Viskosität der Flüssigkeit ansteigt^[4]. Bei hoher Viskosität wird ist aber der Zerstäubungsschritt erschwert, da der volumenspezifische Zerstäubungsenergiebedarf für den Tropfenaufbruch mit Zunahme der inneren Widerstandskräfte der Flüssigkeit stark ansteigt^[5]. Je nach eingesetztem Zerstäubungssystem entstehen dann größere Tropfen und/oder breitere Tropfengrößenverteilungen bis hin zum dem Fall, dass gar keine Zerstäubung mehr möglich ist.

Gängige Zerstäubungssysteme und ihre Beschränkungen

Standardmäßig werden in modernen Sprühtrocknungsanlagen, neben Rotationszerstäubern, hauptsächlich Einstoff-Druckzerstäuber eingesetzt. Allerdings sind diese Zerstäubungssysteme bauartbedingt stark viskositätsbeschränkt, denn die Zerstäubungsenergie wird durch den aufgebrauchten Flüssigkeitsdruck übertragen. Eine Druckerhöhung führt jedoch auch zu einer Erhöhung des durchgesetzten Flüssigkeitsstroms, wodurch die volumenspezifische Zerstäubungsenergie nicht direkt proportional mit dem Flüssigkeitsdruck ansteigt. Außerdem

sind beide Parameter nicht getrennt voneinander regelbar^[2]. Aufgrund dieser Einschränkung liegt die mit Hilfe dieser Zerstäuber maximal verarbeitbare Viskosität, je nach Literaturquelle, zwischen 50 und 100 mPa·s^[6]. Um trotz dieses Grenzwertes höherkonzentrierte Medien trocknen zu können, werden diese in der Praxis meist vorgewärmt. Bei temperatursensiblen Stoffen, wie sie beispielsweise in Proteinkonzentraten vorkommen, sind die Grenzen dieser Maßnahme oft schon bei 60-80 °C erreicht. Eine alternative Zerstäubungsmöglichkeit ist die pneumatische Zweistoffzerstäubung. Bei dieser Art der Zerstäubung wird die für den Tropfenaufbruch benötigte Energie durch ein schnell fließendes, komprimiertes Gas (meist Luft) aufgebracht^[5]. Die Zusammenführung von Zerstäubungsgas und Flüssigkeitsstrom findet standardmäßig außerhalb des Zerstäubers statt (sogenannter außenmischer pneumatischer Zerstäuber). In diesem Fall sind Flüssigkeits- und Gasvolumenstrom unabhängig voneinander regelbar und es können bei entsprechend hohem Gasvolumenstrom auch hochviskose Flüssigkeiten zerstäubt werden. Als Maß für die eingebrachte Zerstäubungsenergie wird meist das Verhältnis zwischen Luft- und Flüssigkeitsmassenstrom als Air-to-Liquid-Ratio by Mass (ALR), entsprechend Gleichung 1, herangezogen.

$$\text{ALR} = \frac{\text{Massenstrom Luft}}{\text{Massenstrom Flüssigkeit}}$$

Gleichung 1



Abb. 1: Aufbau eines ACLR-Zerstäubers, demontiert in transparente Mischkammer und Gaskapillare (links) und im montierten Zustand (rechts).

Außenmischende pneumatische Zerstäuber werden typischerweise in einem ALR-Bereich von 1-10 betrieben. Dies bedeutet allerdings bei industriell relevanten Flüssigkeitsvolumenströmen oft einen so hohen Zerstäubungsluftbedarf, dass ein Betrieb nicht wirtschaftlich ist [2].

Als energiesparende Alternative der pneumatischen Zerstäubung werden in der Literatur oftmals innenmischende pneumatische Zerstäuber vorgeschlagen [7]. Bei diesen Systemen werden Zerstäubungsgas und Flüssigkeit in einer Mischkammer vor dem Düsenauslass in Kontakt gebracht. Hierbei entsteht eine Zweiphasenströmung im Düsenauslasskanal, wobei sich zwischen Gas- und Flüssigkeitsströmung ein Druckgleichgewicht einstellt. Durch diesen Vorgang wird die unabhängige Steuerung der beiden Ströme zwar eingeschränkt, im Vergleich zu Einstoff-Druckdüsen bleibt der Zerstäubungsprozess jedoch über weite Bereiche regelbar und im Vergleich zu außenmischenden pneumatischen Zerstäubern gelingt die Zerstäubung bei niedrigeren Gasanteilen. Allerdings erlauben die meisten der diversen vorgeschlagenen Arten der Gaseinmischung [8] keine definierte Einstellung der resultierenden zerstäuberinternen Zweiphasenströmung. Dadurch sind systematische Untersuchungen zum Einfluss von Prozess- und Geometrieinflüssen auf die anschließende Zerstäubung erschwert bis unmöglich. Dementsprechend stammen die veröffentlichten Ergebnisse zu Zerstäubungsleistungen von innenmischenden pneumatischen Zerstäubern vornehmlich aus empirischen Untersuchungen mit Wasser oder niederviskosen Brennstoffen. Eine ausreichende Wissensbasis für den Einsatz von innenmischenden Zerstäubern im Sprühtrocknungsprozess ist daher zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vorhanden.

Die ACLR-Zerstäubung als Alternative für die Zerstäubung hochviskoser Medien

Ein Vorschlag für einen innenmischenden pneumatischen Zerstäuber ist der sogenannte Ring-

strömungs- oder Air-Core-Liquid-Ring (ACLR) Zerstäuber [9], der in der Lebensmittelverfahrenstechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) entwickelt wurde. Die Eignung des ACLR-Zerstäubers zur energie- und ressourcenschonenden Sprühtrocknung von höherviskosen Medien wurde im Projekt AiF 18299 N des Forschungsbereichs der Ernährungsindustrie (FEI) im Pilotmaßstab untersucht und bestätigt. Das Design dieses Zerstäubers basiert auf der Annahme, dass sich für eine gleichmäßige Zerstäubungsleistung im Düsenauslasskanal eines innenmischenden pneumatischen Zerstäubers eine Ringströmung ausbilden muss [10]. Bei dieser Art der Zweiphasenströmung liegt eine ringförmige Flüssigkeitslamelle mit einem Kern aus komprimierter Luft vor. Beim Austritt aus der Düse expandiert der Gaskern und die Flüssigkeitslamelle zerfällt in feine Sprühtropfen. Bei einem ACLR-Zerstäuber wird diese Art der Zweiphasenströmung durch die Einbringung der Zerstäubungsluft mit einer Kapillare im Zentrum des Flüssigkeitsstroms erzwungen. Dieser Zerstäuber kann bei ALR-Werten von deutlich unter 1 zuverlässig betrieben werden. Der Grundaufbau des ACLR-Zerstäubers ist in Abbildung 1 anhand eines optisch zugänglichen Modells beispielhaft dargestellt [9].

Untersuchung der Zerstäubungs- und Trocknungsleistung des ACLR-Zerstäubers anhand eines Modellsystems

Um die Zerstäubungsleistung des ACLR-Zerstäubers im Sprühtrocknungseinsatz in weiten Viskositäts- und Trockenmassenbereichen zu untersuchen, wurde ein Modellsystem eingesetzt. Dieses basiert auf wässrigen Maltodextrinlösungen mit Zusatz von rekonstituiertem Molkenproteinkonzentrat WPC 80 und wurde an die rheologischen Eigenschaften von WPC 80 aus industrieller Produktion und rekonstituiertem Molkenproteinisolat WPI angepasst. Es wurden hierzu Maltodextrine mit zwei verschiedenen Dextroseäquivalenzwerten (DE-Werten) von 8,6 und 14 verwendet und Gesamttrockenmassegehalte (TM) von 30-50 % mit einem konstanten WPC 80-Anteil von 2 % der Gesamtmasse eingestellt. Maltodextrin DE 8,6 besitzt eine größere mittlere Polymerkettenlänge, wodurch sich eine höhere Lösungsviskosität ausbildet als beim Einsatz der gleichen Masse von Maltodextrin DE 14. Dadurch ist es möglich eine Viskositätsveränderung bei gleichbleibender Trockenmasse darzustellen, wie sie im industriellen Prozess durch eine Temperaturänderung erfolgt. Im Versuchsmaßstab konnten daher die Zerstäubungs- und Trocknungsversuche mit dem Modellsystem bei 25 °C durchgeführt werden. Die Viskositätswerte dieser Modellsysteme in Abhängigkeit der Gesamttrockenmasse bei einer Temperatur von 25 °C sind in Abbildung 2 (quadratische Symbole) dargestellt. Außerdem sind die Viskositätswerte von den Referenzsystemen WPC 80 und rekonstituiertem WPI (runde Symbole) sowie von dem später verarbeiteten industriellen WPC 80-Konzentrat mit Trockenmassen von 36,1 % und 37,2 % (dreieckige Symbole) bei 25 °C, 40 °C und 60 °C einge-

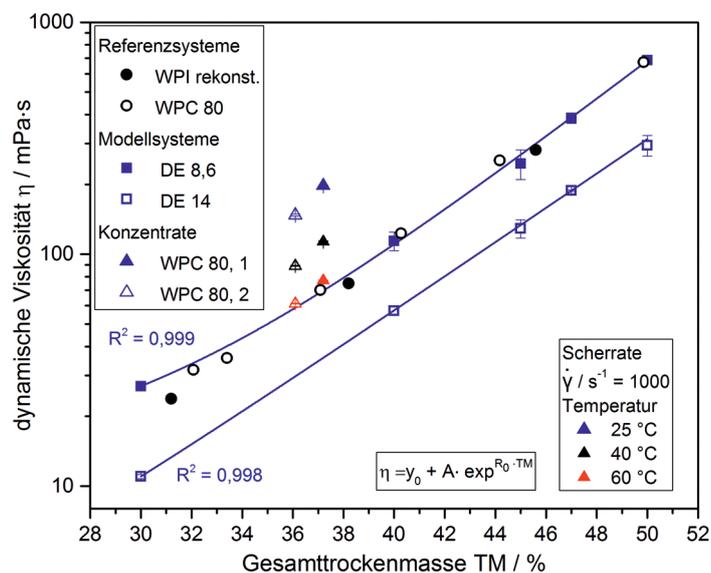


Abb. 2: Viskosität des Modellsystems auf Basis von Maltodextrin mit unterschiedlichem DE-Wert und 2 % rekonstituiertem WPC 80-Pulver, der Referenzsysteme WPC 80 und WPI (rekonstituiert) sowie von frischem WPC 80-Konzentrat (2 Chargen) bei verschiedenen Temperaturen.

tragen. Die Zerstäubungstemperatur im industriellen Prozess liegt bei ca. 60 °C. Die Messungen wurden mit einem Rotationsrheometer (Anton Paar MCR 101) mit Zylindergeometrie bei Scherrate von 1-1000 s⁻¹ durchgeführt. In Abbildung 2 sind die Viskositätswerte bei einer Scherrate von 1000 s⁻¹ dargestellt.

Das Modellsystem wurde für Zerstäubungs- und Sprühtrocknungsversuche unter Verwendung des ACLR-Zerstäubers eingesetzt. Ergänzend wurden Versuche mit einem Einstoff-Druckzerstäuber der Firma Schlick (Schlick 121) durchgeführt. Die mit diesem Einstoff-Druckzerstäuber maximale dauerhaft zerstäubbare Viskosität liegt bei 27 mPa·s (MD 8,6, TM = 30 %). In dem mit beiden Zerstäubern verarbeitbaren Viskositätsbereich bis 27 mPa·s können mittels Druckzerstäubung bei einem Flüssigkeitsdruck von 200 bar engere Tropfengrößenverteilungen erzeugt werden als mit dem ACLR-Zerstäuber bei Gasdrücken zwischen 4 und 9 bar, wobei eine Druckerhöhung auch bei diesem Zerstäuber zu einer Reduktion von größeren Sprühtropfen führt. Entsprechende Tropfengrößenverteilungen aus Laserbeugungsmessungen (Malvern Spraytec) bei einem Flüssigkeitsvolumenstrom von 20 l/h sind in Abbildung 3 dargestellt. In der Pilotsprühtrocknungsanlage Werco SD 20 der Forschungsstelle kann eine mittels ACLR-Zerstäubung (p_G = 6 bar) eingebrachte Modelllösung mit einer Viskosität von 114 mPa·s bei einem Flüssigkeitsvolumenstrom von 15 l/h zuverlässig getrocknet werden. Dieser Wert liegt um ca. 90 mPa·s höher als bei der Verwendung des Druckzerstäubers und damit beim ca. 3,3-fachen Wert. Die zugehörige Sprühtropfengrößenverteilung ist ebenfalls in Abbildung 3 dargestellt.

Sprühtrocknung von Molkenproteinkonzentrat (WPC 80) mittels ACLR-Zerstäubung

Die Eignung des ACLR-Zerstäubers für die Sprühtrocknung wurde auch anhand eines industriellen hochviskosen Proteinkonzentrats untersucht. Dazu wurden Trocknungsversuche im institutseigenen Pilotsprühtrockner Werco SD 20 der Firma Hans G. Werner Industrietechnik GmbH mit einem flüssigen Molkenproteinkonzentrat (WPC 80) der Firma Sachsenmilch durchgeführt. Molkenproteinkonzentrat aus zwei verschiedenen Chargen wurde direkt aus der industriellen Membrankonzentrationsanlage entnommen und über Nacht gekühlt an die Forschungsstelle transportiert. Ein Einfluss der Kühlung auf die rheologischen Eigenschaften der Konzentrate konnte über einen Zeitraum von zwei Tagen nicht festgestellt werden (Viskositätswerte s. Abb. 2).

Für die Sprühtrocknung des Konzentrats wurde eine Eingangstemperatur von 180 °C und eine Ausgangstemperatur von 95 °C bei einem Heißluftmassenstrom von 470 kg/h eingestellt. Der Flüssigkeitsmassenstrom betrug maximal 15,7 L/h wodurch sich bei einem konstanten Zerstäubungsgasdruck von 5,5 bar ein ALR von 0,28 ergibt. Um das Potenzial des ACLR-Zerstäubers im höheren Viskositätsbereich zu verdeutlichen wurde bei einer Vorwärmtemperatur des Mediums von 40 ± 1 °C zerstäubt. Diese liegt um 20 K niedriger als im industriellen Prozess und bedeutet eine fast 50 % höhere Viskosität (89 mPa·s) im Moment der Zerstäubung als im industriellen Prozess (61 mPa·s).

Die Sprühtrocknung verlief über den gesamten Versuchszeitraum von ca. 83 min ohne Komplikationen. Anhaftungen aufgrund zu großer Sprühtropfen, wie sie insbesondere bei Pilotsprühtrocknern mit geringer Bauhöhe vorkommen können, waren nicht vorhanden. Das erzeugte Pulver wurde umfassend analysiert

und mit dem Originalprodukt aus der industriellen Herstellung verglichen.

Abbildung 4 zeigt die Partikelgrößenverteilungen des industriell erzeugten WPC 80 Produktes und des im Pilotmaßstab mittels ACLR-Zerstäubung erzeugten Pulvers. Diese wurden mit einem Horiba Retsch LA 950 Laserbeugungsspektrometer mit Trocken-dispersionseinheit jeweils fünffach gemessen. Bei dem untersuchten Referenzpulver handelt es sich um ein nicht nachagglomeriertes Produkt. Ergänzend ist die bei gleichen Prozessbedingungen gemessene Tropfengrößenverteilung bei der ACLR-Zerstäubung des WPC 80-Konzentrats mit einer Trockenmasse von 37,2 % abgebildet.

Bei beiden Pulverproben wurde über den gesamten Partikelgrößenbereich eine sehr ähnliche Verteilung gemessen. Unterschiede sind lediglich ein minimal erhöhter Feingutanteil und ein etwas erhöhter Grobgutanteil. Letzterer kann vermutlich auf agglomerierte Primärpartikel zurückgeführt werden. Der Restfeuchte-

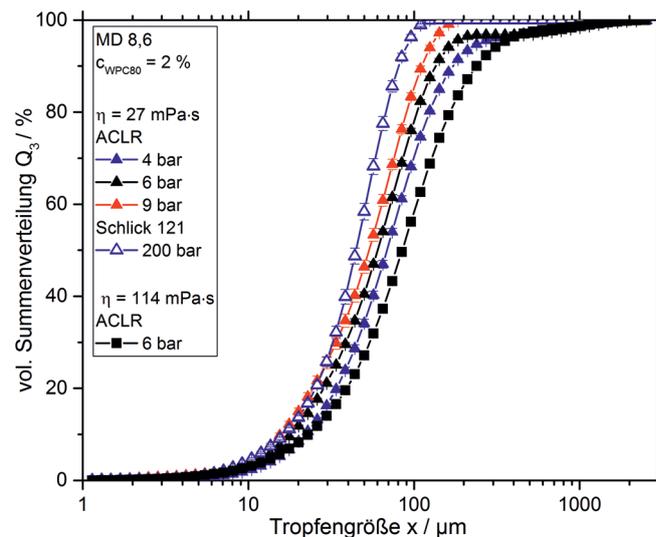


Abb. 3: Tropfengrößenverteilungen bei Zerstäubung des Modellsystems mit MD 8,6 mit dem ACLR-Zerstäuber und der Druckdüse Schlick 121.

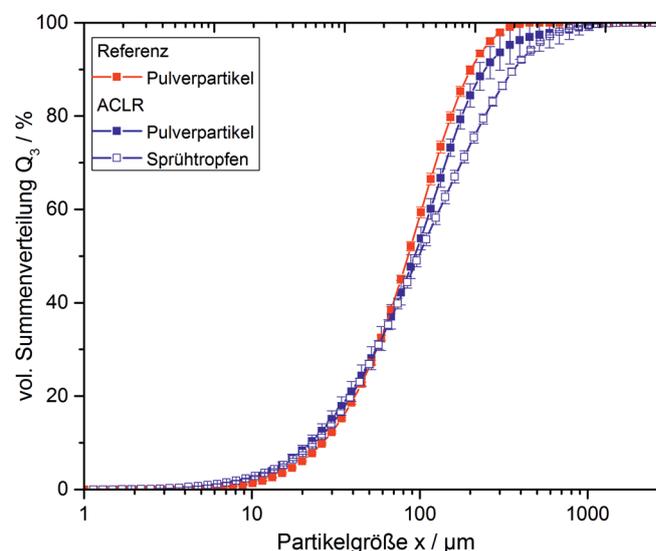


Abb. 4: Partikelgrößenverteilungen des industriell getrockneten Referenzpulvers, des mittels ACLR-Zerstäubung im Pilotmaßstab erzeugten WPC 80-Pulvers und Tropfengrößenverteilung bei der ACLR-Zerstäubung eines WPC 80-Konzentrats mit einer Trockenmasse von 37,2 %.

gehalt des Pulvers aus dem Pilotrockner lag im Mittel bei 9,1 %, wobei das industriell gefertigte Pulver eine Restfeuchte von 5,4 % aufwies. Die a_w -Werte betragen 0,20, respektive 0,12. In beiden Fällen kann von einer zufriedenstellenden mikrobiellen Stabilität ausgegangen werden, wobei bei a_w -Werten unter 0,2 die Fettoxidation wieder zunimmt [11]. Grundsätzlich ist die erhöhte Restfeuchte vermutlich der Größe der Pilotanlage und den damit verbundenen kürzeren Trocknungszeiten als im industriellen Maßstab, geschuldet. Vergleicht man beim ACLR-zerstäubungsbasierten Prozess die Sprühtropfengrößenverteilung mit der Partikelgrößenverteilung des Pulvers, so ist im Bereich der größeren Tropfen eine deutliche Schrumpfung aufgrund des Wasserentzugs zu erkennen. Im geringeren Partikelgrößenbereich ist kein solcher Unterschied mehr zu erkennen. Auch dies ist vermutlich auf die bereits angesprochene Pulveragglomeration zurückzuführen.

Zur Beurteilung der Einzelpartikelmorphologie wurden Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen am Laboratorium für Elektronenmikroskopie des KIT angefertigt. In Abbildung 5 sind vergleichende Übersichtsbilder des industriell hergestellten (links) und des mittels ACLR-Zerstäubung im Pilotmaßstab erzeugten (rechts) WPC 80-Pulvers dargestellt.

Bei beiden Pulverproben sind Partikel von deutlich unterschiedlicher Größe vorhanden. Beim industriell hergestellten Pulver sind teils unregelmäßige und stark runzelige Partikelstrukturen vorhanden. Es sind auch aufgeplatzte Partikel und Buchstücke zu erkennen. Beim mittels ACLR-Zerstäubung erzeugten Pulver sind mehr große Partikel mit eher glatter Oberfläche zu sehen. Es sind weniger offene Partikel und Bruchstücke vorhanden. Anhand der gefundenen Partikelmorphologien können keine nachteiligen Auswirkungen der ACLR-Zerstäubung auf die Partikelmorphologie festgestellt werden.

Energieeffizienz eines ACLR-basierten Sprühtrocknungsprozesses

Für die Effizienzanalyse eines ACLR-zerstäubungsbasierten Sprühtrocknungsprozesses im Vergleich zu einem industriellen Standardprozess mit einfacher Druckzerstäubung wurde zunächst der Energiebedarf für die Zerstäubung mittels ACLR- und Druckzerstäuber ermittelt. Dazu wurde das Energiedichtekonzept verwendet, welches im Bereich der Emulgiertechnik entwickelt wurde [12]. Hierbei wird der volumenspezifische Energieeintrag E_v quantifiziert und mit der resultierenden Zerkleinerungsleistung anhand der nach dem in Gleichung 2 dargestellten Zusammenhang verknüpft.

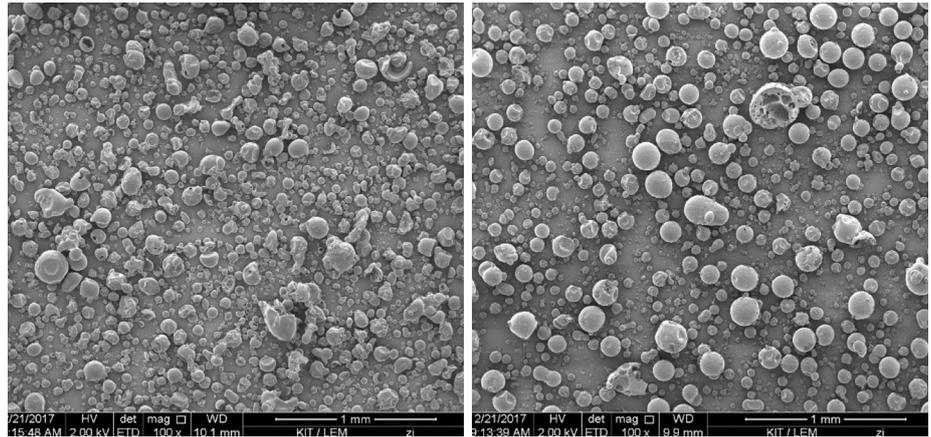


Abb. 5: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen des industriell hergestellten (links) und des mittels ACLR-Zerstäubung im Pilotmaßstab erzeugten (rechts) WPC 80-Pulvers.

$$x_{1,2} = C \cdot E_v^{-b} \quad \text{Gleichung 2}$$

Die Übertragung in den Bereich der Zerstäubungstechnik wurde von Stähle durchgeführt [13]. Dabei werden die folgenden Gleichungen für die Berechnung der Energiedichte E_v verwendet. Die Energiedichte E_v ist definiert als Quotient L.

$$E_v = \frac{P}{V_L} \quad \text{Gleichung 3}$$

Bei Druckzerstäubern entspricht die Leistung P dem Produkt aus Flüssigkeitsdruck p_L und Flüssigkeitsvolumenstrom Q_L . So entspricht die Energiedichte bei der Druckzerstäubung dem verwendeten Flüssigkeitsdruck zur Zerstäubung.

$$E_{v, \text{Druck}} = p_L \quad \text{Gleichung 4}$$

Für den ACLR-Zerstäuber, sind für die Berechnung der Energiedichte die Leistungseinträge aus Flüssigkeits- und Gasstrom zu berücksichtigen. Die Beiträge werden entsprechend Gleichung 5 addiert.

$$E_{v, \text{ACLR}} = \frac{p_G \cdot Q_L + M_G \cdot \ln \frac{p_{G, \text{abs}}}{p_{G, 0}}}{Q_L} \quad \text{Gleichung 5}$$

Der erste Summand des Zählers entspricht dem Leistungseintrag durch den Flüssigkeitsstrom, der zweite Summand entspricht dem Leistungseintrag durch den Gasstrom mit der vereinfachten Annahme einer adiabaten Gasverdichtung. Außerdem wird vereinfachend angenommen, dass sich Flüssigkeits- und Gasdruck entsprechen.

Für die Bewertung der Prozesskapazität einer Sprühtrocknungsanlage ist jedoch nicht der Volumenstrom der Flüssigkeit die entscheidende Prozessgröße. Vielmehr ist der massenbezogene

Durchsatz an erzeugtem Pulver entscheidend. Dafür wird für die weiteren Berechnungen die massenspezifische Energiedichte E_m eingeführt. Wenn bei gleichem Flüssigkeitsvolumenstrom der verarbeitete Trockenmasseanteil gesteigert wird, wie dies bei der ACLR-Zerstäubung möglich ist, kann bei gleichem Flüssigkeitsdurchsatz mehr Pulver pro Zeit produziert werden. Dementsprechend verringert sich bei einer gleichbleibenden volumenspezifischen Energiedichte E_v mit steigender Trockenmasse die auf die resultierende Pulvermasse bezogene massenspezifische Energiedichte E_m . Da im erzeugten Pulver grundsätzlich eine gewisse Restfeuchte enthalten ist, muss diese in den Wert der massenspezifischen Energiedichte bezogen auf das zu erzeugende Pulver $E_{m, \text{Pulver}}$ eingerechnet werden (Gleichung 6).

$$E_{m, \text{Pulver}} = \frac{E_v \text{ Medium}}{p_L \cdot (c_{TM} + c_{\text{Restfeuchte}})} \quad \text{Gleichung 6}$$

Für die Bewertung des Energieverbrauchs der ACLR-Zerstäubung im Gesamtsprühtrocknungsprozess wird beispielhaft die aufgebrauchte volumenspezifische Energiedichte E_v bei einem Gasdruck von 8 bar über die Flüssigkeitsdichte ρ_L des Mediums mit Maltodextrin DE 8,6 und 2% WPC 80 (TM = 30 – 50 %) in eine massenspezifische Energiedichte E_m umgerechnet und auf eine theoretisch zu erzeugende Pulvermasse mit einer Restfeuchte von 5 % bezogen. Durch die Berechnung mit dem höchsten durchgängig untersuchten Gasdruck von 8 bar wurde die Energieeffizienz der ACLR-Zerstäubung möglichst konservativ abgeschätzt. Dennoch sollte beachtet werden, dass bei der Sprühtrocknung des frischen Molkenproteinkonzentrats WPC 80 bereits ein Gasdruck von 5,5 bar (ALR = 0,28) ein zufriedenstellendes Trocknungsergebnis

lieferte. Zum Vergleich mit dem derzeit industriell eingesetzten Prozess wurden die Werte des mit dem Druckzerstäuber Schlick 121 trockenbaren Mediums mit einer Trockenmasse von 30 % ($\eta = 27 \text{ mPa}\cdot\text{s}$) bei Zerstäubung mit einem Flüssigkeitsdruck von 200 bar verwendet. Tabelle 1 zeigt die Werte des erzeugten Sprühsauterdurchmessers, der volumen- und massenspezifischen Energiedichte bezogen auf das Gesamtmedium, sowie der massenspezifischen Energiedichte bezogen auf das zu erzeugende Pulver (Restfeuchte 5 %).

Es ist ersichtlich, dass die Druckzerstäubung ($E_{m \text{ Pulver}} = 48,2 \text{ kJ/kg}$) im zerstäubbaren Viskositätsbereich deutlich energieeffizienter ist als die ACLR-Zerstäubung ($E_{m \text{ Pulver}} = 174,0 \text{ kJ/kg}$). Jedoch bietet die bei der ACLR-Zerstäubung mögliche Steigerung der Trockenmasse eine deutliche Effizienzsteigerung, da bei der Pulvererzeugung, im Gegensatz zur Zerstäubung, die massenspezifische Energiedichte den entscheidenden Faktor darstellt. Dieser Wert sinkt aufgrund des höheren Trockenmassedurchsatzes mit steigender Aufkonzentrierung, auch wenn die volumenspezifische Energiedichte konstant bleibt.

Für eine umfassende energetische Betrachtung eines ACLR-basierten Sprühtrocknungsprozesses ist zusätzlich noch der Energiebedarf der vorgeschalteten Aufkonzentration und der des eigentlichen Trocknungsschrittes einzubeziehen. Diese sind in Abhängigkeit der Trockenmasse in Abbildung 6 dargestellt. Die Darstellung wurde aus der Literatur übernommen [3], für einen Prozess im Trockenmassenbereich von 30 – 50 % adaptiert und durch den Energiebedarf der Zerstäubung erweitert. Die folgenden Annahmen zum Energiebedarf bei der Eindampfung und im Sprühtrocknungsprozess wurden aus der angegebenen Quelle [3] übernommen. Für den Entzug von 1 kg Wasser wird im Eindampfer ein Verbrauch von 0,5 kg Dampf, im Sprühtrockner ein Verbrauch von $2 \text{ kg}_{\text{Dampf}} / \text{kg}_{\text{Wasser}}$ angenommen. Für

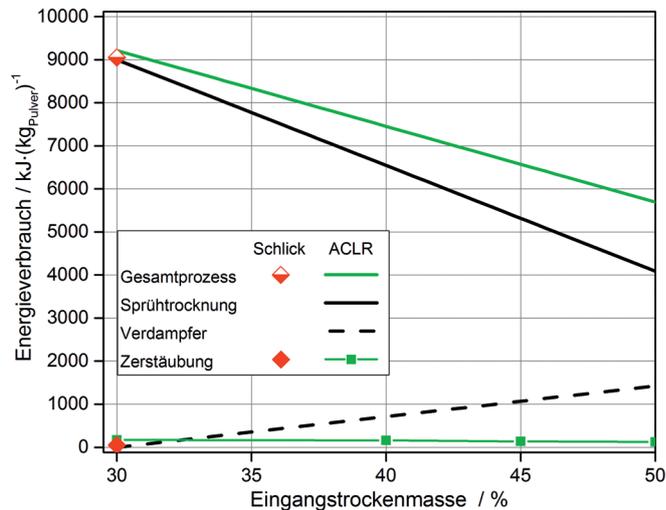


Abb. 6: Gesamt- und Komponentenenergieverbrauch eines theoretischen, ACLR-zerstäubungs-basierten Sprühtrocknungsprozesses.

die Erzeugung von 1 kg Dampf wird mit einem Energieaufwand von 2250 kJ/kg gerechnet. Zum Vergleich ist ebenfalls ein Prozess mit einer Druckzerstäubung mittels Druckdüse (Schlick) dargestellt. Aufgrund der Viskositätsbeschränkung dieses Düsentyps ist keine Erhöhung der Trockenmasse über 30 % hinaus möglich. Die durchgezogene grüne Linie zeigt den Gesamtenergieverbrauch eines theoretischen Sprühtrocknungsprozesses mit ACLR-Zerstäubung und vorgeschaltetem Verdampfer mit thermischer Brüdenverdichtung. Dabei wird ein Prozess angenommen, bei dem ein Pulver mit einer Restfeuchte von 5 % erzeugt wird. Bei einem Eingangstrockenmassengehalt von 30 % liegt der Gesamtenergieverbrauch für den Prozess mit Druckzerstäubung auf Grund der energieeffizienteren Zerstäubung zwar ca. 1,8 % unterhalb des Werts des ACLR-zerstäubungs-basierten Prozesses, aber mit zunehmender Eingangstrockenmasse im Sprühtrocknungsprozess ändert sich dieser Effizienzvorteil zu Gunsten der ACLR-Zerstäubung,

Der Anteil des Energieverbrauchs für die Zerstäubung am Gesamttrocknungsprozess ist für beide Zerstäubertypen vergleichsweise gering. Daher überwiegt

der Vorteil eines energieeffizienten Wasserentzugs im Verdampfer den Nachteil der geringeren Energieeffizienz der ACLR-Zerstäubung rechnerisch schon ab einer Trockenmasserhöhung ΔTM von 1 %, da dies in einer Energieersparnis von ca. 1,9 % resultiert. Eine Erhöhung der Trockenmasse von 30 % auf 40 % ergibt somit, bei Verwendung der ACLR Zerstäubung, abzüglich des Zerstäubungseffizienzunterschieds zur Druckzerstäubung (bei $TM = 30 \%$: 1,8 %) eine Energieersparnis von 17,3 %. Eine Trockenmasserhöhung vor dem Eintritt in den Sprühtrockner in Kombination mit einem ACLR-Zerstäubungsprozess ist damit aus energetischer Sicht sinnvoll. Ebenfalls kann durch die vorgelagerte Aufkonzentrierung im Verdampfer der Pulverdurchsatz einer bestehenden Sprühtrocknungsanlage deutlich gesteigert werden, da die Kapazität dieses Prozesses primär von der realisierbaren Wasserverdampfungsrate abhängig ist.

Fazit

Anhand der durchgeführten und hier dargestellten Untersuchungen zum Einsatz der ACLR-Zerstäubung in der Sprühtrocknung von hochviskosen Medien konnte gezeigt werden, dass diese Zerstäubungstechnik eine sinnvolle Weiterentwicklung der derzeit im industriellen Einsatz befindlichen Systeme darstellt. In der Pilotsprühtrocknungsanlage konnte eine mittels ACLR-Zerstäubung eingebrachte Modelllösung mit einer Viskosität von 114 mPa·s zuverlässig getrocknet werden. Das verarbeitete Molkenproteinkonzentrat WPC 80 wurde, im Vergleich zur industriellen Anwendung, mit einer um 45 % gesteigerten Viskosität zerstäubt und getrocknet. Unterschiede

Tab 1: Energieeffizienzanalyse der ACLR-Zerstäubung im Vergleich zum Druckzerstäubungsprozess.

Zerstäuber	TM / %	$x_{1,2} / \mu\text{m}$	$E_{v \text{ Medium}} / \text{kJ/L}$	$E_{m \text{ Medium}} / \text{kJ/kg}$	$E_{m \text{ Pulver}} / \text{kJ/kg}$
Schlick 121	30	30,1	20,0	16,9	48,2
ACLR	30	30,2	69,7	60,9	174,0
	40	37,6	85,4	72,2	160,4
	45	44,0	83,0	68,7	137,4
	50	58,6	87,4	70,6	128,4

in den Produktmerkmalen können eher der Herabskalierung des Trocknungsprozesses als dem veränderten Zerstäubungsprozess zugeschrieben werden. Auf Basis der durchgeführten Arbeiten ist davon auszugehen, dass die ACLR-Zerstäubung auch im industriellen Maßstab eingesetzt werden kann. Hierbei ist aufgrund der größeren Sprühtrocknerhöhe und damit längeren Verweilzeiten im Heißluftstrom mit vergleichbaren oder besseren Trocknungsergebnissen zu rechnen.

Die durchgeführten Berechnungen zum Effizienzsteigerungspotenzial von bestehenden Sprühtrocknungsprozessen zeigen deutlich die Vorteile der Kombination einer Trockenmassenerhöhung vor dem Eintritt in den Sprühtrockner mit einem ACLR-Zerstäubungsprozess gegenüber dem üblichen Druckzerstäubungsprozess. Eine Erhöhung der Eingangstrockenmasse von 30 % auf 31 % resultiert demnach bereits in einer Energieersparnis von ca. 1,9 %. Bei einer weiteren Steigerung der Trockenmasse auf 40 %, wie es in Pilotversuchen durchgeführt wurde, ergibt sich bereits eine Gesamtenergieeinsparung von 17,3 %.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Frau Andrea Butterbrodt, Herrn Volker Zibat und allen beteiligten Studenten für die Unterstützung bei den Versuchsdurchführungen und Analysen.

Referenzen

- [1] MUJUMDAR, Arun S. (Hrsg.): *Handbook of Industrial Drying*. 4. Aufl. Boca Raton: CRC Press, 2015
- [2] MASTERS, K.: *Spray Drying in Practice*. Charlottenlund/DK: SprayDryConsult International ApS, 2002
- [3] FOX, Martijn ; AKKERMAN, Coen ; STRAATSMAN, Han ; JONG, Peter de: *Energy reduction by high dry matter concentration and drying*. In: *New Food*, 2010
- [4] RAO, M. Anandha: *Rheology of fluid, semisolid, and solid foods: Principles and applications*. Third edition. New York: Springer, 2014
- [5] RICHTER, Thomas: *Zerstäuben von Flüssigkeiten: Düsen und Zerstäuber in Theorie und Praxis*. Renningen: Expert-Verl., 2004
- [6] BAYVEL, L. P.; ORZECOWSKI, Z.: *Liquid atomization*. Washington, DC: Taylor & Francis, 1993
- [7] LÖRCHER, M.: *Zerstäuben von zweiphasigen Gemischen aus Flüssigkeiten und Gasen*. Düsseldorf, VDI Verlag, 2003
- [8] MLKVIK, Marek ; STÄHLE, Philipp ; SCHUCHMANN, Heike P. ; GAUKEL, Volker ; JEDELSKY, Jan; JICHA, Miroslav: *Twin-fluid atomization of viscous liquids : The effect of atomizer construction on breakup process, spray stability and droplet size*. In: *International Journal of Multiphase Flow* (2015), Nr. 77, S. 19–31
- [9] STÄHLE, Philipp ; GAUKEL, Volker ; SCHUCHMANN, Heike P.: *Comparison of an Effervescent Nozzle and a Proposed Air-Core-Liquid-Ring (ACLR) Nozzle for Atomization of Viscous Food Liquids at Low Air Consumption*. In: *Journal of Food Process Engineering* 40 (2015)
- [10] STÄHLE, Philipp; GAUKEL, Volker; SCHUCHMANN, Heike P.: *Investigation on the Applicability of the Effervescent Atomizer in Spray Drying of Foods: Influence of Liquid Viscosity on Nozzle Internal Two-Phase Flow and Spray Characteristics*. In: *Journal of Food Process Engineering* 38 (2015), Nr. 5, S. 474–487
- [11] SCHUCHMANN, Harald (Hrsg.); SCHUCHMANN, Heike P. (Hrsg.): *Lebensmittelverfahrenstechnik: Rohstoff, Prozesse, Produkte*. 1. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2005
- [12] KÖHLER, Karsten (Hrsg.); SCHUCHMANN, Heike P. (Hrsg.): *Emulgiertechnik: Grundlagen, Verfahren und Anwendungen*. 3. Aufl. Hamburg: Behr's Verlag, 2012
- [13] STÄHLE, Philipp; SCHUCHMANN, Heike P.; GAUKEL, Volker: *Performance and Efficiency of Pressure-Swirl and Twin-Fluid Nozzles Spraying Food Liquids with Varying Viscosity*. In: *Journal of Food Process Engineering* (2015)

... ein Projekt der **Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)**

gefördert durch/via



Das o. g. IGF-Vorhaben der Forschungsvereinigung Forschungskreis der Ernährungsindustrie e. V. (FEI), Godesberger Allee 142-148, 53175 Bonn, wird/wurde über die AIF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Repository KITopen

Dies ist ein Postprint/begutachtetes Manuskript.

Empfohlene Zitierung:

Wittner, M. O.; Schuchmann, H. P.; Gaukel, V.

[Energie- und ressourcenschonende Sprühtrocknung von hochviskosen Flüssigkeiten mittels Air-Core-Liquid-Ring \(ACLR\) Zerstäubung.](#)

2017. FOOD-LAB

DOI: [10.5445/IR/1000085908](https://doi.org/10.5445/IR/1000085908)

Zitierung der Originalveröffentlichung:

Wittner, M. O.; Schuchmann, H. P.; Gaukel, V.

[Energie- und ressourcenschonende Sprühtrocknung von hochviskosen Flüssigkeiten mittels Air-Core-Liquid-Ring \(ACLR\) Zerstäubung.](#)

2017. FOOD-LAB, (2), 52–57

Lizenzinformationen: [KITopen-Lizenz](#)