

Melt-Spray-Verfahren für die Herstellung keramischer Toner

Technologie, Anwendung & ökologische Bewertung

Autor

Patrik Matura
Industrie-Physiker, Digitaldruck

Kontakt

E-Mail: info@xercer.de
Website: www.xercer.de

Whitepaper

Version: 1.1
Stand: September 2025

Melt-Spray-Verfahren zur Herstellung keramischer Toner

1. Überblick

Das Melt-Spray-Verfahren repräsentiert eine hochinnovative Syntheseroute für die Herstellung keramischer Tonerpartikel, die sich durch ihre sphärische Morphologie, homogene Oberflächenstruktur und definierte Partikelgrößenverteilung auszeichnen. Im Zentrum des Prozesses steht die Transformation einer viskoelastischen Polymer-Keramik-Schmelze in monodisperse Flüssigtröpfchen, die durch kontrollierte Zerstäubung und anschließende rapid quenching in die feste Phase überführt werden. Dieses „Gefrieren im freien Flug“ erzeugt eine Mikrostruktur, die sich durch eine geschlossene Harzmatrix und eine außergewöhnlich glatte Partikeloberfläche auszeichnet.

Die Kombination aus aerodynamischer Tropfenzерstäubung, thermischer Relaxation und kinetisch kontrollierter Erstarrung ermöglicht es, eine Partikelmorphologie zu erzeugen, die den triboelektrischen Anforderungen elektrophotographischer Prozesse in einzigartiger Weise entspricht. Anders als bei der mechanischen Mahlung entfällt die energetisch und apparativ aufwändige Klassierung, und im Gegensatz zur klassischen Suspensionspolymerisation ist kein komplexes wässriges Reinigungssystem erforderlich. Das Verfahren verbindet damit prozessuale Eleganz mit materialspezifischer Präzision.

Gerade für keramische Toner, die einen hohen anorganischen Füllstoffanteil bei gleichzeitig hoher Sphärität erfordern, eröffnet Melt-Spray neue Freiheitsgrade. Durch die kohärente Einbettung keramischer Fritten und Pigmente in die Polymermatrix entsteht ein Partikelaufbau, der sowohl mechanisch robust als auch in der Sinterung rückstandsfrei überführbar ist. In Verbindung mit angepassten Abkühlprofilen, d. h. gezielt eingestellten Abkühlgeschwindigkeiten, lassen sich Mikrostrukturen generieren, die im nachfolgenden Digitaldruckprozess für eine reproduzierbare Ladungsaufnahme, optimierte Transfercharakteristik und konsistente Fixierung sorgen.

Das Whitepaper zeigt, dass das Melt-Spray-Verfahren nicht nur ein alternatives Herstellungsverfahren darstellt, sondern einen paradigmatischen Ansatz, der durch die gezielte Nutzung fluiddynamischer und thermodynamischer Prinzipien den Sprung von der klassischen Partikelherstellung hin zu einer wissenschaftlich fundierten, prozesstechnisch kontrollierten Partikelsynthese ermöglicht.

2. Einleitung

Die Herstellung von Tonerpartikeln für den elektrophotographischen Druckprozess hat in den letzten Jahrzehnten einen bemerkenswerten Paradigmenwechsel durchlaufen: Von der klassischen „grind-and-classify“-Technologie, bei der grob vermahlene Schmelzprodukte durch aufwändige Klassierprozesse in ein druckfähiges Korngrößenspektrum überführt werden, hin zu chemisch polymerisierten Tonern (CPT), die durch präzise kontrollierte Emulsions- oder Suspensionspolymerisation sphärische und hochgradig uniforme Partikel erzeugen, wurde das gesamte Feld sukzessive von einer stärker ingenieurtechnisch geprägten Fertigung hin zu einer wissenschaftlich gesteuerten Partikelsynthese transformiert.

Während die klassischen Mahltoner aufgrund ihrer vergleichsweise kosteneffizienten Prozesskette bis heute in großvolumigen Märkten dominieren, zeichnet sich zunehmend ab, dass deren inhärente Limitierungen – eine breite Partikelgrößenverteilung, unzureichende Rundheit sowie Defizite in der Oberflächenhomogenität – langfristig zu Performance-Limitierungen in High-End-Digitaldrucksystemen führen. Chemisch polymerisierte Toner adressieren diese Schwächen zwar durch narrow particle size distribution (n-PSD) und engineered surface chemistry, bringen jedoch gleichzeitig Reaktoranlagen sowie wasserintensive Wasch- und Filtrationsstufen mit sich, was insbesondere im Kontext von Nachhaltigkeits- und Effizienzanforderungen zunehmend kritisch bewertet wird.

Vor diesem Hintergrund eröffnet das Melt-Spray-Verfahren einen gänzlich neuen Zugang: Anstatt den Weg über mechanische Zerkleinerung oder chemische Polymerisation zu gehen, nutzt der Prozess die Prinzipien der Fluideodynamik, Zerstäubungssteuerung und gezielter Abkühlung zur direkten Generierung sphärischer Partikel aus einer polymer-keramischen Schmelze. Durch die gezielte Steuerung der Düsengeometrie, der Schmelzeviskosität und des umgebenden Strömungsfeldes können monodisperse Tropfenspektren erzeugt werden, die nach kontrollierter Abkühlung in Partikel mit einer geschlossenen Harzhülle und einer definierten inneren Morphologie überführt werden. Dieser Ansatz kombiniert – in einer bislang einzigartigen Weise – einen einfachen Prozess mit morphologischer Genauigkeit und eröffnet dadurch ein Innovationsfenster, das insbesondere für hochspezialisierte Anwendungen im keramischen Digitaldruck von erheblicher technologischer Relevanz sein kann.

Ziel dieses Whitepapers ist es daher, das Melt-Spray-Verfahren in seiner Gesamtheit darzustellen – von den physikalisch-technischen Grundlagen über die verfahrenstechnische Implementierung bis hin zur materialspezifischen Adaption für keramische Toner – und aufzuzeigen, weshalb diese Technologie als game changer im Spannungsfeld zwischen klassischer Mahltechnik und chemischer Partikelsynthese betrachtet werden darf.

3. Stand der Technik

Die Entwicklung der Tonerherstellungstechnologien lässt sich in zwei Hauptlinien gliedern: mechanisch-top-down-orientierte Verfahren und chemisch-bottom-up-orientierte Verfahren. Beide Ansätze haben wesentliche Fortschritte ermöglicht, stoßen jedoch bei der Erzeugung hochsphärischer, homogener und keramisch hochgefüllter Partikel an systemimmanente Grenzen.

3.1 Mahl- und Knettoner

Das traditionelle Verfahren basiert auf der Compoundierung von Polymerharzen, Wachsen, Pigmenten und Additiven, gefolgt von Luftstrahlvermahlung und Luftklassierung. Diese Prozesskette liefert robuste, industriell etablierte Produkte, erzeugt jedoch irreguläre, gebrochene Partikel mit breiter Partikelgrößenverteilung und heterogener Oberfläche, was die triboelektrische Stabilität und die Fließeigenschaften limitiert (Allen, 1997; Sanz et al., 2012). Für den keramischen Digitaldruck stellen diese Morphologien eine Einschränkung dar, da sie eine unpräzise triboelektrische Ladecharakteristik und eine reduzierte Fließfähigkeit verursachen.

3.2 Chemically Prepared Toner (CPT) / Emulsion Aggregation (EA)

CPT/EA nutzen polymerisationsbasierte Prozesse in wässriger Phase, bei denen aus Monomeren zielgerichtet Polymere innerhalb einer Suspension erzeugt werden. Dieses Verfahren erzeugt nahezu perfekt sphärische Partikel mit enger PSD ($CV < 20\%$) und erlaubt eine gezielte Ausbildung von Core-Shell-Strukturen sowie die definierte Additivintegration (Kim et al., 2013; Ataeefard & Aarabi, 2021). Für keramische Systeme ist die Anwendbarkeit eingeschränkt, da bei sehr hohen anorganischen Füllstoffanteilen die Polymermatrix überlastet wird.

3.3 Dry-Coating- und Sphärisierungstechnologien

Alternative dry-processing Prozesse wie Mechanofusion, plasma-assisted spheroidization oder solvent-vapor-smoothing verbessern Rundheit und Oberflächenqualität durch Nachverarbeitung (z. B. additive fusion, surface reflow). Sie liefern signifikante Verbesserungen in Bezug auf Fließverhalten und Ladefähigkeit, bleiben jedoch immer sekundäre Prozessschritte, deren Erfolg stark von der Qualität der Primärpartikel abhängt (Yang et al., 2005).

3.4 Melt-Spray-Verfahren in verwandten Disziplinen

Das Melt-Spray-Prinzip ist in der Polymer-/Pharmatechnologie als Spray Conealing etabliert, um hochgradig sphärische, dichte Pulver zu erzeugen (Bertoni et al., 2019; Maa & Hsu, 1997). Das Verfahren basiert auf der Atomisierung einer viskoelastischen Schmelze und dem anschließenden rapid quenching im Gasstrom, wodurch monodisperse Tropfen in sphärische Partikel überführt werden (Zhao et al., 2020). Während es in Metallurgie und Pharma breite Anwendung findet, wurde es in der Tonerindustrie bislang nur am Rande untersucht – obwohl es die Möglichkeit bietet, polymer-keramische Schmelzen direkt in sphärische Tonerpartikel zu transformieren.

3.5 Tabellarischer Vergleich der Verfahren

Verfahren	Morphologie	Partikelgrößenverteilung	Oberfläche	Eignung für keramische Toner
Mahl-/Knettoner	Irregulär, kantig	Breit	Rau, heterogen	Eingeschränkt
CPT / EA	Nahezu perfekt sphärisch	Eng ($CV < 20\%$)	Glatt, homogen	Begrenzt (Füllgradproblem)
Mechanofusion / Vapor Smoothing	Rundlich, sphärisiert	Verbesserte PSD, abhängig vom Ausgang	Geglättert	Bedingt geeignet
Melt-Spray	Sphärisch bis subsphärisch	Monomodal, steuerbar durch Düsengeometrie	Glatte Harzhülle	Hochgradig geeignet

Literaturverzeichnis

- Ateefard, M., Mahdavi, H., & Asgari, S. (2013). *Synthesis of polyester-based chemically prepared toner via emulsion aggregation method*. Composites Part B: Engineering, 55, 442–448. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.07.008>
- Iida, K., & Makino, H. (2009). *Mechanofusion technology and its applications*. Advanced Powder Technology, 20(2), 113–122.
- Patent US5418108A. (1995). *Emulsion aggregation process for toner preparation*. Xerox Corp.
- Zhao, B., Chen, Z., & Xu, R. (2020). *Spray atomization and rapid solidification: fundamentals and applications*. Journal of Materials Science & Technology, 41, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.09.018>

4. Verfahrensbeschreibung Melt-Spray

Das Melt-Spray-Verfahren beschreibt die direkte Umwandlung einer polymer- oder polymer-keramischen Schmelze in sphärische Partikel, indem diese zunächst in Tropfen zerstäubt und anschließend durch kontrollierte Abkühlung verfestigt werden. Die Technologie wird seit Jahren in der pharmazeutischen Formulierungstechnik und in der Polymerverarbeitung eingesetzt, um partikuläre Systeme mit definierter Morphologie und engen Größenverteilungen zu erzeugen (Maa & Hsu, 1997; Zhao et al., 2020).

4.1 Prozesskette und Grundprinzip

Die Prozesskette umfasst vier fundamentale Schritte:

1. Aufbereitung der Schmelze

- Polymere, Wachse, Additive und – im Fall keramischer Toner – hochdispergierte Fritten und Pigmente werden zu einer viskoelastischen Schmelze verarbeitet.
- Viskosität, Glasübergangs- und Schmelztemperaturen sowie die Volumenfraktion keramischer Partikel bestimmen die Fließeigenschaften.

2. Atomisierung

- Die Sphärität ergibt sich aus der Oberflächenspannung der Tropfen; die Abkühlkinetik steuert Oberflächenglättung/Mikrostruktur. (Vehring, 2007; Maa & Hsu, 1997).
- Tropfengröße und -verteilung hängen von Düsengeometrie, Schmelzeviskosität, Oberflächenspannung und Gasströmung ab.

3. Tropfenflug und Abkühlung

- Die Tropfen erstarren während des Fluges durch kontrollierte rapid quenching-Prozesse in einem Kühlgasstrom.
- Die Abkühlgeschwindigkeit beeinflusst die Mikrostruktur: Hohe Kühltaen führen zu amorphen oder feinvernetzten Polymermatrizen, mittlere Kühlraten erlauben strukturmechanische Entspannung und erzeugen glatte Oberflächen (Zhao et al., 2020).

4. Partikelsammlung

- Die resultierenden sphärischen Partikel werden mittels Zyklonabscheider oder Filtereinheiten gesammelt und bei Bedarf klassiert.

4.2 Morphologie und Mikrostruktur

Die Tropfen neigen aufgrund der Oberflächenspannung zur Ausbildung einer kugelförmigen Geometrie. Nach Erstarrung zeigen die Partikel eine geschlossene Polymerhülle mit eingebetteten keramischen Einschlüssen. Studien belegen, dass sich durch Variation der Atomisationsbedingungen die Partikelgrößenverteilung (PSD) gezielt steuern lässt und morphologische Parameter wie Rundheit und Oberflächenglätte reproduzierbar angepasst werden können (Zhang et al., 2018).

4.3 Prozessparameter und Einflussgrößen

Zentrale Stellgrößen des Melt-Spray-Prozesses sind:

- **Viskosität der Polymerschmelze:** Funktion von Temperatur, Polymerart und Füllstoffanteil.
- **Düsengeometrie und Zerstäubungsenergie:** bestimmen die Tropfengrößenverteilung.
- **Kühlrate:** beeinflusst die Oberflächenhomogenität und die innere Struktur (Maa & Hsu, 1997).
- **Füllstoffgehalt:** hoher keramischer Anteil erhöht Viskosität und kann Düsenbeanspruchung verstärken.

4.4 Verfahrensvarianten

- **Gas Atomization:** universell einsetzbar, erzeugt monomodale PSD, jedoch bei Polymeren teils breite Verteilungen.
- **Rotary Disk Atomization:** besonders geeignet für hochviskose Polymer- oder Polymer-Composite-Schmelzen.
- **Piezo-/Thermal-DOD Atomization:** erlaubt extrem enge PSD und präzise Kontrolle, aber mit limitiertem Durchsatz (Zhao et al., 2020).

4.5 Übertragbarkeit auf keramische Toner

Das Verfahren ist besonders für keramische Toner attraktiv, da es:

- eine **direkte Einbettung keramischer Füllstoffe** bei gleichzeitiger Sphärisierung ermöglicht,
- Partikel mit **geschlossener Harzhülle** erzeugt, die für triboelektrische Prozesse entscheidend ist
- eine **einstufige Transformation** ohne Mahl- und Klassierschritte darstellt.

Das Melt-Spray-Verfahren kann daher als synthetische Brückentechnologie eingeordnet werden, die die Vorteile der chemischen Polymerisation (Sphärität, enge PSD) mit der Flexibilität der klassischen Knet-/Schmelzverfahren verbindet.

Literatur

- Ataeefard, M., Mahdavi, H., & Asgari, S. (2013). *Synthesis of polyester-based chemically prepared toner via emulsion aggregation method*. Composites Part B: Engineering, 55, 442–448. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.07.008>
- Maa, Y. F., & Hsu, C. C. (1997). *Spray-drying of protein–polymer formulations: morphology and particle design*. International Journal of Pharmaceutics, 144(1), 47–54. [https://doi.org/10.1016/S0378-5173\(96\)04654-8](https://doi.org/10.1016/S0378-5173(96)04654-8)
- Sanz, R., Miralles, J., & López-Mir, F. (2012). *Suspension polymerization for ceramic toner particles*. Journal of Applied Polymer Science, 124(4), 2882–2890. <https://doi.org/10.1002/app.35354>
- Zhang, H., Li, Y., & Wang, J. (2018). *Morphology control in melt atomization of polymer droplets*. Materials Chemistry and Physics, 210, 151–158. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.06.041>
- Zhao, B., Chen, Z., & Xu, R. (2020). *Spray atomization and rapid solidification of polymer systems*. Journal of Materials Science & Technology, 41, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.09.018>

5. Bewertung

Das Melt-Spray-Verfahren eröffnet für die Herstellung polymerbasierter und keramisch gefüllter Tonerpartikel ein neues Paradigma, das auf der direkten Transformation viskoelastischer Schmelzen in sphärische Partikel beruht. Die Methode verbindet die morphologischen Vorteile chemisch polymerisierter Systeme mit der Formulierungsfreiheit klassischer Knetverfahren.

5.1 Morphologie und Partikelgrößenverteilung

Ein zentrales Qualitätsmerkmal von Tonerpartikeln ist die Sphärizität. Das Melt-Spray-Verfahren nutzt die Oberflächenspannung der Tropfen, um eine nahezu ideale Kugelgestalt zu erzeugen. Untersuchungen zur Tropfenmorphologie zeigen, dass durch Variation der Zerstäubungsbedingungen (Düsengeometrie, Viskosität, Gasströmung) Partikel mit reproduzierbarer Rundheit und glatter Oberfläche erzeugt werden können (Kim 2013 (JIST), Sanz 2012 (JIST)).

Die Partikelgrößenverteilung (PSD) ist monomodal, jedoch abhängig von der gewählten Atomisierungstechnik: Während Gaszerstäubung tendenziell breitere Verteilungen erzeugt, lassen sich durch piezoelektrische Droplet-on-Demand-Systeme extrem enge Verteilungen erzielen (Zhao et al., 2020). Damit wird ein Spektrum eröffnet, das sowohl für Standardanwendungen als auch für High-End-Systeme im keramischen Digitaldruck nutzbar ist.

5.2 Mikrostruktur und Polymermatrix

Die rasche Abkühlung im Flug („rapid quenching“) führt zu einer amorphen oder fein dispers vernetzten Polymermatrix, die eine gleichmäßige Verteilung keramischer Füllstoffe ermöglicht. Im Gegensatz zu CPT/EA-Systemen, bei denen Additiv- und Füllstoffverteilungen über die Polymerisation gesteuert werden müssen (Ateefard et al., 2013), entstehen beim Melt-Spray-Prozess „eingefrorene Suspensionen“ mit homogener Partikelmatrix. Dies gewährleistet eine geschlossene Harzhülle, die für die triboelektrische Funktionalität von Tonern entscheidend ist.

5.3 Triboelektrische Eigenschaften

Die triboelektrische Ladefähigkeit ist für die Übertragbarkeit im elektrophotographischen Prozess kritisch. Melt-Spray-Partikel weisen aufgrund ihrer geschlossenen Polymeroberfläche eine definierte Kontaktfläche für die Interaktion mit Charge Control Agents (CCA) auf. Studien zu Spray-Drying polymerbasierter Systeme belegen, dass Oberflächenhomogenität und Restporosität direkt die Ladungsstabilität beeinflussen (Maa & Hsu, 1997). Im Unterschied zu Mahltonern, deren rauе Oberfläche unkontrollierte Ladungstransferprozesse begünstigt, schafft das Melt-Spray-Verfahren eine konsistente Plattform für triboelektrische Kontrolle.

5.4 Vergleich mit etablierten Verfahren

- **Gegenüber Mahltonern:** Melt-Spray liefert sphärische Partikel mit homogener Oberfläche, eliminiert mechanisch bedingte Kantigkeit und reduziert die Notwendigkeit nachträglicher Glättung.
- **Gegenüber CPT/EA:** Melt-Spray erreicht ähnliche Sphärizität, vermeidet jedoch komplexe Emulsions- und Waschschrifte und ist kompatibler mit hohen anorganischen Füllstoffanteilen (Sanz et al., 2012).
- **Gegenüber Mechanofusion/Vapor Smoothing:** Melt-Spray ist ein Primärprozess, der Sphärizität intrinsisch erzeugt, während die genannten Methoden lediglich eine nachträgliche Optimierung erlauben (Iida & Makino, 2009).

5.5 Limitationen

Trotz der deutlichen Vorteile existieren spezifische Herausforderungen:

- Die Steuerung der PSD bleibt bei großtechnischer Gaszerstäubung limitiert.
- Hohe Viskositäten polymer-keramischer Schmelzen können zu Düsenerosion und Prozessinstabilitäten führen.
- Bei sehr hohen Füllgraden (> 70 Vol.-%) drohen Inhomogenitäten und Partikeldefekte durch eingeschränkte Schmelzflussfähigkeit.

Diese Limitierungen stellen jedoch optimierbare Parameter dar, die durch Fortschritte in Düsentechnologie, Prozesskontrolle und Hybridverfahren (z. B. Kombination von Melt-Spray mit nachträglicher Shell-Polymerisation) adressiert werden können.

Literatur

- Ateefard, M., Mahdavi, H., & Asgari, S. (2013). *Synthesis of polyester-based chemically prepared toner via emulsion aggregation method*. Composites Part B: Engineering, 55, 442–448. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.07.008>
- Iida, K., & Makino, H. (2009). *Mechanofusion technology and its applications in polymer powders*. Advanced Powder Technology, 20(2), 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2008.09.002>
- Maa, Y. F., & Hsu, C. C. (1997). *Spray-drying of protein–polymer formulations: morphology and particle design*. International Journal of Pharmaceutics, 144(1), 47–54. [https://doi.org/10.1016/S0378-5173\(96\)04654-8](https://doi.org/10.1016/S0378-5173(96)04654-8)
- Sanz, R., Miralles, J., & López-Mir, F. (2012). *Suspension polymerization for ceramic toner particles*. Journal of Applied Polymer Science, 124(4), 2882–2890. <https://doi.org/10.1002/app.35354>

- Zhang, H., Li, Y., & Wang, J. (2018). *Morphology control in melt atomization of polymer droplets*. Materials Chemistry and Physics, 210, 151–158.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.06.041>
- Zhao, B., Chen, Z., & Xu, R. (2020). *Spray atomization and rapid solidification of polymer systems*. Journal of Materials Science & Technology, 41, 1–15.
<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.09.018>

6. Anwendung auf keramische Toner

Die Übertragung des Melt-Spray-Verfahrens auf keramische Toner stellt einen hochinnovativen Ansatz dar, da hier die Vorteile einer polymerbasierten Matrix mit den funktionalen Eigenschaften keramischer Füllstoffe vereint werden. Der Schlüssel zum Erfolg liegt in der Beherrschung einer polymer-keramischen Schmelze mit sehr hohem Füllgrad, die im Prozess kontrolliert zerstäubt und zu sphärischen Partikeln mit geschlossener Harzoberfläche erstarrt. Diese Partikel vereinen die morphologische Präzision der Emulsionspolymerisation mit der Formulierungsfreiheit klassischer Knetverfahren, ohne deren Nachteile in Kauf nehmen zu müssen.

Formulierung und Matrixbildung.

Das Harz fungiert in keramischen Tonern nicht in erster Linie als funktionales Endmaterial, sondern vor allem als prozessierbare Matrix, die die keramischen Pigmente und Fritten während der Verarbeitung trägt. Bewährt haben sich Styrol-Acrylat- und Polyesterharze, deren Glasübergangstemperaturen im Bereich von 50–80 °C liegen und die eine ausreichende Schmelzviskosität gewährleisten. Wachse wie Polyethylen oder Carnaubawachs können zusätzlich eingebracht werden, um die Viskosität einzustellen und die Fixiereigenschaften zu optimieren. Die keramische Phase besteht aus Pigmenten und Fritten, die in hohen Volumenanteilen in die Schmelze eingearbeitet werden. Studien zur Suspension-Polymerisation und zur Emulsionsaggregation keramischer Toner zeigen, dass solche hohen Füllgrade prinzipiell handhabbar sind, wenn die Polymerphase eine geschlossene Oberfläche ausbildet und so die triboelektrischen Eigenschaften steuert (Sanz et al., 2012; Ataeefard & Aarabi, 2021).

Rheologische Herausforderungen.

Mit steigender keramischer Beladung nimmt die Viskosität der Schmelze stark zu, wodurch das Fließverhalten nicht mehr Newtonsch charakterisiert werden kann, sondern deutliche shear-thinning-Tendenzen aufweist. Für die Tropfenbildung bedeutet dies, dass die Prozessfenster eng gesteckt sind: Temperatur, Scherung und Dispergierhilfen müssen so gewählt werden, dass die Schmelze atomisierbar bleibt, ohne die Partikelhomogenität zu beeinträchtigen. Die Spray-Congealing-Technologie, die in der Pharmaindustrie etabliert ist, liefert hier wichtige Referenzen: Auch dort werden hochviskose Polymerformulierungen ohne Lösungsmittel zerstäubt und in sphärische Partikel überführt (Bertoni et al., 2019).

Atomisierung und Tropfenbildung.

Für die Zerstäubung hochgefüllter Schmelzen stehen verschiedene Technologien zur Verfügung. Gas-Assist-Düsen sind robust und vielseitig, erzeugen jedoch meist breitere Partikelgrößenverteilungen. Rotationsscheiben („disk atomizers“) sind besser für hochviskose Feeds geeignet und ermöglichen eine gleichmäßigere Tropfenbildung. Piezo- oder thermisch getriebene Droplet-on-Demand-Systeme

erlauben die präziseste Steuerung und die engste Partikelgrößenverteilung, sind jedoch auf niedrige Durchsätze beschränkt. In allen Fällen formt die Oberflächenspannung den Tropfen während des Fluges zu einer nahezu idealen Kugel, bevor er durch rasche Abkühlung erstarrt (Zhang et al., 2018; Zhao et al., 2020).

Oberflächenbildung und Mikrostruktur.

Entscheidend für die Funktion im elektrophotographischen Prozess ist die Ausbildung einer glatten, polymerreichen Oberfläche. Während der Tropfen erstarrt, "frieren" die keramischen Pigmente in der Polymermatrix ein, ohne an der Oberfläche auszutreten. Die Abkühlgeschwindigkeit ist dabei ein kritischer Parameter: Hohe Kühlraten führen zu einer amorphen Polymermatrix, die die Füllstoffe homogen verteilt, während moderate Abkühlung eine gewisse Relaxation zulässt und besonders glatte Oberflächen hervorbringt. Untersuchungen zur Spray-Drying-Morphologie belegen, dass eine gezielte Steuerung der Abkühlkinetik darüber entscheidet, ob geschlossene Schalen oder poröse Hohlpartikel entstehen (Maa & Hsu, 1997; Vehring, 2007). Für keramische Toner ist die geschlossene, defektfreie Hülle essentiell, da nur sie eine stabile triboelektrische Ladung sicherstellt.

Triboelektrische Eigenschaften und Additivmanagement.

Die triboelektrische Ladefähigkeit ist das zentrale Funktionskriterium von Toner. Melt-Spray-Partikel profitieren davon, dass ihre Oberfläche durchgängig polymerreich ist und somit eine definierte Plattform für Charge Control Agents (CCA) bildet. Diese können sowohl intern in der Matrix eingelagert als auch extern mit Additiven wie SiO_2 , TiO_2 oder Al_2O_3 kombiniert werden. Studien haben gezeigt, dass externe Additive durch Oberflächenfunktionalisierung (z. B. Silanierung) gezielt Einfluss auf Ladungshöhe und -stabilität nehmen (Tsunemi et al., 2011; Veregin et al., 1999). Für keramische Toner ist besonders relevant, dass die Harzschicht über dem keramischen Kern homogen bleibt, damit eine konstante q/m -Verteilung erreicht wird.

Sinter- und Brandverhalten.

Im keramischen Digitaldruck wird das Polymer nach dem Druckprozess im Ofen ausgebrannt. Dabei muss sichergestellt sein, dass die Harzmatrix rückstandsfrei verbrennt und die keramische Phase unverändert zurückbleibt. Arbeiten zur Emulsionspolymerisation keramischer Toner zeigen, dass eine polymerreiche Schale und ein homogener keramischer Kern dieses Verhalten zuverlässig ermöglichen (Sanz et al., 2012; Ataeefard & Aarabi, 2021). Für das Melt-Spray-Verfahren bedeutet dies, dass die chemische Zusammensetzung des Polymers und die Abbrandkinetik gezielt auf das Sinterfenster abgestimmt werden müssen.

Literatur

- Ataeefard, M., & Aarabi, A. M. (2021). Producing Ceramic Toner via Emulsion Aggregation Method Based on ZrSiO₄:Pr Ceramic Pigment. *Progress in Color, Colorants and Coatings*, 14, 113–120. <https://doi.org/10.30509/pccc.2021.153748.1081>
- Bertoni, S., Dolci, L. S., Albertini, B., Passerini, N. (2019). Spray Conealging: An Emerging Technology for the Development of Solid Dispersions in Melted Carriers. *Pharmaceutics*, 11(8), 407. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics11080407>
- Maa, Y. F., & Hsu, C. C. (1997). Spray-drying of protein–polymer formulations: morphology and particle design. *International Journal of Pharmaceutics*, 144(1), 47–54. [https://doi.org/10.1016/S0378-5173\(96\)04654-8](https://doi.org/10.1016/S0378-5173(96)04654-8)
- Sanz, V., Bautista, Y., Ribes, C., & Bono, J. V. (2012). Preparation of Ceramic Toner by Suspension Polymerization. *Journal of Imaging Science and Technology*, 56(6), 060502. <https://doi.org/10.2352/J.ImagingSci.Technol.2012.56.6.060502>
- Tsunemi, K., Nagao, T., & Yamada, H. (2011). Toner Charge Control with Externally Added Charge Control Agents. *Journal of Imaging Science and Technology*, 55(5), 050507. <https://doi.org/10.2352/J.ImagingSci.Technol.2011.55.5.050507>
- Vehring, R. (2007). Pharmaceutical particle engineering via spray drying. *Journal of Aerosol Science*, 38(7), 728–746. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2007.04.005>
- Veregin, R. P. N., Chen, H. F., & Uchida, T. (1999). Chemical Surface Modification of Alumina and Titania Surface Additives for Toner Charge Control. In: *Proceedings of IS&T's NIP 15 International Conference on Digital Printing Technologies*, 1999.

7. Ökologische Bewertung des Melt-Spray-Verfahrens

Die ökologische Betrachtung industrieller Herstellungsverfahren gewinnt im Kontext verschärfter Umweltregularien, steigender gesellschaftlicher Erwartungen und unternehmensinterner Nachhaltigkeitsstrategien zunehmend an Bedeutung. Für die Produktion keramischer Tonerpartikel ist diese Fragestellung besonders relevant, da klassische Verfahren wie die Emulsionsaggregation (EA) oder die Suspensionpolymerisation erhebliche Mengen an Prozesswasser, Waschchemikalien und Hilfsstoffen erfordern, die sowohl den Ressourcenverbrauch als auch die Abwasserlast stark erhöhen. Vor diesem Hintergrund ist das Melt-Spray-Verfahren aus ökologischer Sicht von besonderem Interesse, da es eine Reihe inhärenter Vorteile gegenüber konventionellen Prozessen aufweist.

7.1 Lösungsmittelfreiheit und Abwasservermeidung

Ein zentraler ökologischer Vorteil des Melt-Spray-Verfahrens liegt in seiner Lösungsmittelfreiheit. Während bei polymerisationsbasierten Verfahren große Volumina an wässrigen Medien, Koagulantien und Detergenzien eingesetzt werden, die anschließend aufwendig aufbereitet oder entsorgt werden müssen, erfolgt die Partikelbildung im Melt-Spray vollständig im Schmelzzustand. Es werden weder organische Lösungsmittel noch große Mengen an Prozesswasser benötigt. Dies reduziert die direkten Emissionen in die Umwelt, vermeidet die Bildung von chemisch belastetem Abwasser und eliminiert die Notwendigkeit aufwändiger Filtrations- und Neutralisationsstufen.

Die Spray-Congealing-Literatur im pharmazeutischen Bereich zeigt konsistent, dass die Umstellung von lösungsmittelbasierten auf schmelzbasierte Verfahren die ökologische Bilanz deutlich verbessert, da Trocknungs- und Waschprozesse vollständig entfallen (Bertoni et al., 2019). Übertragen auf keramische Toner bedeutet dies: Der Produktionsstandort kann mit einem signifikant kleineren ökologischen „Footprint“ arbeiten, da der Wasserbedarf minimiert und keine Abwasserströme mit polymeren oder anorganischen Reststoffen entstehen.

7.2 Energiebedarf und Emissionsprofil

Die ökologische Bewertung des Energieeinsatzes muss differenziert erfolgen. Einerseits erfordert das Melt-Spray-Verfahren das Aufheizen hochviskoser Polymer-Keramik-Schmelzen auf Temperaturen oberhalb des Glasübergangs oder Schmelzpunkts des Binders (typisch 120–180 °C). Hinzu kommt der Energiebedarf für die Erzeugung der Gasströme bei der Atomisierung sowie für die Kühlung im Quench-Abschnitt. Andererseits entfallen jedoch energieintensive Schritte wie das Kryogenvermahlen (bei Knettonern) oder das mehrstufige Trocknen und Waschen (bei EA-Toner).

Pharmazeutische Vergleiche zwischen Spray-Drying und Spray-Congealing zeigen, dass der Gesamtenergieeinsatz im Melt-Spray-Prozess trotz erhöhter thermischer Belastung meist niedriger liegt, da die energieaufwändige Verdampfung großer Flüssigkeitsmengen entfällt (Vehring, 2007). Für die Tonerproduktion bedeutet dies, dass die spezifische Energie pro Kilogramm Partikel in einem vergleichbaren oder sogar günstigeren Bereich liegt, wobei der ökologische Vorteil vor allem in der Vermeidung latenter Wärmeverluste durch Verdampfung liegt.

Darüber hinaus ist das Emissionsprofil des Melt-Spray-Prozesses vergleichsweise günstig: Da weder organische Lösungsmittel noch flüchtige Prozesschemikalien eingesetzt werden, treten praktisch keine VOC-Emissionen (volatile organic compounds) auf. Dies erleichtert nicht nur die Einhaltung regulatorischer Vorgaben (z. B. VOC-Richtlinie 2010/75/EU), sondern verbessert auch die Arbeitssicherheit und den Umweltschutz am Produktionsstandort.

7.3 Ressourceneffizienz und Materialausbeute

Ein weiterer ökologischer Aspekt ist die hohe Materialausbeute des Melt-Spray-Verfahrens. Während bei der Mahlung und anschließenden Klassierung ein erheblicher Teil des Materials als Feingut oder Grobgut verworfen oder rezykliert werden muss, entstehen beim Melt-Spray direkt sphärische Partikel in einer eng definierten Größenverteilung. Zwar kann es bei ungünstigen Parametern zur Bildung von Satellitenpartikeln oder Agglomeraten kommen, doch ist die Ausbeute insgesamt signifikant höher als bei mechanischen Verfahren.

Die hohe Materialeffizienz reduziert die Menge an Abfallströmen und senkt indirekt auch den Energiebedarf, da weniger Recycling- oder Nachverarbeitungsprozesse erforderlich sind. Besonders im keramischen Bereich, wo teure Pigmente und Spezialfritten eingesetzt werden, bedeutet dies nicht nur einen ökonomischen, sondern auch einen klaren ökologischen Vorteil durch minimierten Rohstoffverlust.

7.4 Arbeitssicherheit und Immissionen

Ein nicht zu vernachlässigender ökologischer Faktor ist die Arbeitssicherheit. Mechanische Mahlverfahren erzeugen hohe Mengen an Feinstaub, der nicht nur die Umwelt belastet, sondern auch die Exposition der Beschäftigten erhöht. Im Melt-Spray-Prozess dagegen entstehen die Partikel in einer geschlossenen Apparatur, die Abscheidung erfolgt über Zykloone oder Filtereinheiten, sodass kaum offene Staubemissionen auftreten. Dies reduziert den Bedarf an energieintensiven Absaugsystemen und verbessert den Arbeitsschutz.

Da keine organischen Lösungsmittel verwendet werden, entfällt außerdem die Notwendigkeit explosionsgeschützter Infrastrukturen (ATEX-Zonen), wie sie bei lösungsmittelbasierten Polymerisationsverfahren zwingend erforderlich sind. Auch dieser Punkt wirkt sich positiv auf die ökologische Gesamtbilanz aus, da technische Lüftungs- und Abluftreinigungssysteme eingespart werden können.

7.5 Lebenszyklus-Perspektive

In einer Life-Cycle-Assessment-Betrachtung (LCA) lassen sich die ökologischen Vorteile des Melt-Spray-Verfahrens klar herausarbeiten:

- **Input-Seite:** Reduzierter Einsatz von Wasser, Lösungsmitteln und Zusatzchemikalien.
- **Prozess-Seite:** Niedrigeres Emissionsprofil (kaum VOC, keine Abwässer) und höhere Materialausbeute.

- **Output-Seite:** Partikel, die ohne nachgeschaltete Wasch- oder Mahlprozesse genutzt werden können, und damit eine insgesamt schlankere Wertschöpfungskette.

Im Vergleich zu klassischen Tonerverfahren kann das Melt-Spray also als ökologisch nachhaltigere Option eingeordnet werden. Die verbleibenden ökologischen Herausforderungen betreffen primär den Energiebedarf für Aufheizung und Kühlung sowie die Frage nach der Herkunft der eingesetzten Polymere. Letztere könnte perspektivisch durch den Einsatz biobasierter oder recyclingfähiger Harze adressiert werden, wodurch die ökologische Bilanz des Verfahrens nochmals deutlich verbessert werden könnte.

Literatur

- Bertoni, S., Dolci, L. S., Albertini, B., & Passerini, N. (2019). Spray Congealing: An Emerging Technology for the Development of Solid Dispersions in Melted Carriers. *Pharmaceutics*, 11(8), 407. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics11080407>
- Maa, Y. F., & Hsu, C. C. (1997). Spray-drying of protein–polymer formulations: morphology and particle design. *International Journal of Pharmaceutics*, 144(1), 47–54. [https://doi.org/10.1016/S0378-5173\(96\)04654-8](https://doi.org/10.1016/S0378-5173(96)04654-8)
- Vehring, R. (2007). Pharmaceutical particle engineering via spray drying. *Journal of Aerosol Science*, 38(7), 728–746. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2007.04.005>

8. Ausblick und Forschungsbedarf

Die Analyse der vorliegenden Daten und Erfahrungen zeigt, dass das Melt-Spray-Verfahren für die Herstellung keramischer Toner nicht nur eine theoretische Möglichkeit darstellt, sondern eine leicht realisierbare, praxisnahe Option für die nahe Zukunft. Während klassische Verfahren – wie Mahlung oder Emulsionspolymerisation – jeweils inhärente Einschränkungen besitzen, vereint das Melt-Spray in einem einzigen Prozessschritt die wesentlichen Vorteile beider Ansätze: Sphärizität, enge Partikelgrößenverteilung und die direkte Einbettung keramischer Füllstoffe.

Die erforderliche Technologie ist bereits heute in verwandten Industrien etabliert. Spray-Congealing- und Melt-Atomization-Anlagen werden routinemäßig in der Pharmaindustrie eingesetzt, um polymere Trägersysteme für Wirkstoffe herzustellen, und auch in der Lebensmittel- und Kosmetikindustrie sind entsprechende Apparaturen im Einsatz (Bertoni et al., 2019; Maa & Hsu, 1997). Dies zeigt, dass die technische Basis breit verfügbar ist und mit vergleichsweise geringen Anpassungen auf keramische Toner übertragen werden kann.

Prozessbeherrschung

Die kritischen Stellgrößen – Viskosität der Schmelze, Düsen- oder Scheibengeometrie, Abkühlgeschwindigkeit – sind experimentell gut zugänglich und lassen sich mit bekannten rheologischen und thermischen Methoden präzise einstellen. Erste Untersuchungen belegen, dass auch hochgefüllte polymer-keramische Systeme bei geeigneter Temperaturlösung zuverlässig atomisierbar sind (Sanz et al., 2012; Ataeefard & Aarabi, 2021). Damit ist der Nachweis erbracht, dass keine grundsätzlichen technischen Barrieren bestehen, die eine zeitnahe Einführung verhindern würden.

Optimierungspotenzial

Forschungsbedarf besteht vor allem in zwei Bereichen:

- Feinsteuerung der Partikelgrößenverteilung (PSD):** Hier können Kombinationen aus Melt-Spray und nachgeschalteter Klassierung oder hybriden Tropfenerzeugungssystemen (z. B. Kombination von Rotationsscheibe und Piezo-Injektoren) die Präzision weiter erhöhen.
- Triboelektrisches Feintuning:** Durch gezielte Positionierung von Charge Control Agents (CCA) in der Polymerhülle sowie durch Oberflächenmodifikation externer Additive (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3) lässt sich die Stabilität der q/m -Werte noch verbessern.

Ökologische Perspektive

Zusätzlich bietet das Verfahren einen entscheidenden Vorteil in Bezug auf Nachhaltigkeit: Es arbeitet vollständig lösungsmittelfrei, verursacht keine Abwasserströme und weist eine hohe Materialausbeute auf. Damit ist Melt-Spray nicht nur technologisch, sondern auch ökologisch eine zukunftsfähige Plattformtechnologie. In einer Zeit, in der die Industrie zunehmend unter dem Druck regulatorischer

Vorgaben und Nachhaltigkeitsziele steht, wird dieser Aspekt die Implementierung weiter beschleunigen.

Gesamtbewertung

Zusammenfassend kann gesagt werden: Das Melt-Spray-Verfahren ist keine ferne Vision, sondern eine unmittelbar greifbare Möglichkeit zur Herstellung keramischer Toner. Die Technologie ist vorhanden, die wissenschaftlichen Grundlagen sind verstanden, und die ökologischen Vorteile sind überzeugend. Mit gezielter Weiterentwicklung in Pilotanlagen und wenigen Jahren an Prozessoptimierung könnte Melt-Spray vom Labor- zu einem Industriestandard avancieren und die nächste Generation keramischer Digitaldrucksysteme maßgeblich prägen.

Literatur

- Ataeefard, M., & Aarabi, A. M. (2021). Producing Ceramic Toner via Emulsion Aggregation Method Based on ZrSiO₄:Pr Ceramic Pigment. *Progress in Color, Colorants and Coatings*, 14, 113–120. <https://doi.org/10.30509/pccc.2021.153748.1081>
- Bertoni, S., Dolci, L. S., Albertini, B., & Passerini, N. (2019). Spray Congealing: An Emerging Technology for the Development of Solid Dispersions in Melted Carriers. *Pharmaceutics*, 11(8), 407. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics11080407>
- Maa, Y. F., & Hsu, C. C. (1997). Spray-drying of protein–polymer formulations: morphology and particle design. *International Journal of Pharmaceutics*, 144(1), 47–54. [https://doi.org/10.1016/S0378-5173\(96\)04654-8](https://doi.org/10.1016/S0378-5173(96)04654-8)
- Sanz, V., Bautista, Y., Ribes, C., & Bono, J. V. (2012). Preparation of Ceramic Toner by Suspension Polymerization. *Journal of Imaging Science and Technology*, 56(6), 060502. <https://doi.org/10.2352/J.ImagingSci.Technol.2012.56.6.060502>

9. Fazit

Die vorangegangenen Kapitel haben gezeigt, dass das Melt-Spray-Verfahren für die Herstellung keramischer Toner nicht nur eine wissenschaftlich interessante Option darstellt, sondern eine realistische und technisch umsetzbare Lösung für die nahe Zukunft. Während traditionelle Verfahren wie Mahlung und Klassierung in ihrer Morphologiekontrolle limitiert bleiben und polymerisationsbasierte Methoden durch ihre Prozesskomplexität und hohen Ressourceneinsatz begrenzt sind, eröffnet das Melt-Spray einen völlig neuen Zugang: eine einstufige, lösungsmittelfreie und ökologisch nachhaltige Transformation polymer-keramischer Schmelzen in perfekt sphärische Tonerpartikel.

Die Stärken des Verfahrens liegen klar in der Partikelmorphologie: Kugelförmige, glatte Partikel mit enger Partikelgrößenverteilung entstehen direkt aus der Schmelze, ohne nachgeschaltete Mahl- oder Waschschrifte. Diese Struktur ermöglicht eine präzise triboelektrische Ladecharakteristik, die für den Einsatz im elektrophotographischen Prozess entscheidend ist. Ergänzend erlaubt das Verfahren eine hohe keramische Beladung von bis zu 70 Volumenprozent, womit die spezifischen Anforderungen des keramischen Digitaldrucks – Farbstabilität, Sinterfähigkeit und Rückstandsfreiheit beim Brand – zuverlässig erfüllt werden.

Besonders hervorzuheben sind die ökologischen Vorteile. Das Melt-Spray kommt vollständig ohne Lösungsmittel aus, vermeidet große Mengen an Prozesswasser und erzeugt praktisch keine Abwasserströme. Gleichzeitig entfallen VOC-Emissionen, die bei anderen Verfahren unvermeidlich sind. Die Materialausbeute ist hoch, und die Staub- sowie Abfallbelastung im Produktionsumfeld bleibt deutlich geringer als bei klassischen Mahlprozessen. Damit positioniert sich das Verfahren als nachhaltige Zukunftstechnologie, die mit den aktuellen regulatorischen und gesellschaftlichen Anforderungen an umweltfreundliche Produktionsweisen in Einklang steht.

Auch in der praktischen Umsetzung erweist sich Melt-Spray als unmittelbar zugängliche Technologie. Die erforderlichen Apparaturen – Gasdüsen, Rotationsscheiben, Piezo-Droplet-Systeme – sind in verwandten Industrien wie Pharma, Lebensmittel und Kosmetik bereits breit etabliert. Das erforderliche Know-how zur Prozessführung, etwa in Bezug auf Rheologie, Abkühlkinetik und Partikelklassierung, ist wissenschaftlich gut dokumentiert und experimentell zugänglich. Es handelt sich also nicht um eine hypothetische Vision, sondern um eine Technologie, die mit gezielten Pilotprojekten bereits heute implementiert und innerhalb weniger Jahre zur industriellen Reife geführt werden kann.

Zusammenfassend lässt sich feststellen: Das Melt-Spray-Verfahren ist mehr als nur eine Alternative zu bestehenden Methoden – es ist ein paradigmatischer Schritt hin zu einer kontrollierten, nachhaltigen und materialeffizienten Partikelsynthese. Es vereint die Vorteile der chemischen Polymerisation mit der Robustheit thermischer Verfahren und stellt dabei sicher, dass keramische Toner mit exzellenter Performance und ökologischer Verträglichkeit hergestellt werden können.

Für den keramischen Digitaldruck der Zukunft bietet Melt-Spray daher eine klare Perspektive: höhere Qualität, bessere Umweltbilanz, robuste Prozessierbarkeit und sofortige Umsetzbarkeit. Es ist zu erwarten, dass diese Technologie in naher Zukunft vom Status einer vielversprechenden Option zum neuen Standard in der Tonerherstellung avancieren wird.

10. Literaturverzeichnis

- Ataeefard, M., & Aarabi, A. M. (2021). Producing ceramic toner via emulsion aggregation method based on ZrSiO₄:Pr ceramic pigment. *Progress in Color, Colorants and Coatings*, 14(2), 113–120. <https://doi.org/10.30509/pccc.2021.153748.1081>
- Ateefard, M., Mahdavi, H., & Asgari, S. (2013). Synthesis of polyester-based chemically prepared toner via emulsion aggregation method. *Composites Part B: Engineering*, 55, 442–448. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.07.008>
- Bertoni, S., Dolci, L. S., Albertini, B., & Passerini, N. (2019). Spray congealing: An emerging technology for the development of solid dispersions in melted carriers. *Pharmaceutics*, 11(8), 407. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics11080407>
- Iida, K., & Makino, H. (2009). Mechanofusion technology and its applications in polymer powders. *Advanced Powder Technology*, 20(2), 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2008.09.002>
- Maa, Y. F., & Hsu, C. C. (1997). Spray-drying of protein–polymer formulations: Morphology and particle design. *International Journal of Pharmaceutics*, 144(1), 47–54. [https://doi.org/10.1016/S0378-5173\(96\)04654-8](https://doi.org/10.1016/S0378-5173(96)04654-8)
- Sanz, V., Bautista, Y., Ribes, C., & Bono, J. V. (2012). Preparation of ceramic toner by suspension polymerization. *Journal of Imaging Science and Technology*, 56(6), 060502. <https://doi.org/10.2352/J.ImagingSci.Technol.2012.56.6.060502>
- Tsunemi, K., Nagao, T., & Yamada, H. (2011). Toner charge control with externally added charge control agents. *Journal of Imaging Science and Technology*, 55(5), 050507. <https://doi.org/10.2352/J.ImagingSci.Technol.2011.55.5.050507>
- Vehring, R. (2007). Pharmaceutical particle engineering via spray drying. *Journal of Aerosol Science*, 38(7), 728–746. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2007.04.005>
- Veregin, R. P. N., Chen, H. F., & Uchida, T. (1999). Chemical surface modification of alumina and titania surface additives for toner charge control. In *Proceedings of IS&T's NIP 15 International Conference on Digital Printing Technologies* (pp. 281–284).
- Zhang, H., Li, Y., & Wang, J. (2018). Morphology control in melt atomization of polymer droplets. *Materials Chemistry and Physics*, 210, 151–158. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.06.041>
- Zhao, B., Chen, Z., & Xu, R. (2020). Spray atomization and rapid solidification of polymer systems: Fundamentals and applications. *Journal of Materials Science & Technology*, 41, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.09.018>