

Daniel Beckers

Untersuchung des Einflusses der Kammerströmung auf die Partikelmorphologie bei der Zerstäubung von Metallschmelzen

Untersuchung des Einflusses der Kammerströmung auf die Partikelmorphologie bei der Zerstäubung von Metallschmelzen

Vom Fachbereich Produktionstechnik

der

UNIVERSITÄT BREMEN

Zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte

Dissertation

von

Master of Science, Daniel Beckers

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Udo Fritsching, Prof. Dr.-Ing. Sergiy Antonyuk (Technische
Universität Kaiserslautern)

Tag der mündlichen Prüfung: 15.10.2021

Berichte aus der Verfahrenstechnik

Daniel Beckers

**Untersuchung des Einflusses der Kammerströmung
auf die Partikelmorphologie bei der Zerstäubung von
Metallschmelzen**

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag
Düren 2022

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Bremen, Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2022

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8471-9

ISSN 0945-1021

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Zuerst möchte ich mich bei meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. habil. Udo Fritsching bedanken für die vielen konstruktiven Diskussionen und Treffen und die damit verbundene Zeit, die er für mich in diese Arbeit investiert hat. Besonders bedanke ich mich auch dafür, dass er nicht nur für fachlichen Input gesorgt hat, sondern mich auch nach Kräften bei allen Nebenschauplätzen unterstützt hat.

Weiterhin möchte ich mich bei meinen ehemaligen Kollegen und Weggefährten bedanken, die mich über die Zeit am IWT-Bremen und auch danach begleitet haben. Mein besonderer Dank gilt hier Dr.-Ing. Volker Uhlenwinkel, meinem früheren Abteilungsleiter, der diese Arbeit erst ermöglicht hat und Dr.-Ing. Lydia Achelis die mich schon zu meiner Zeit als studentischer Mitarbeiter für die Verfahrenstechnik im Allgemeinen und für die Metallzerstäubung im Speziellen begeistert hat. Meinen Kollegen Dr.-Ing. Nils Ellendt und Dr.-Ing. Christoph Meyer, sowie Eric Gärtner danke ich für die Zeit, in der wir über alle möglichen sinnvollen und auch weniger sinnvollen Ideen diskutiert und philosophiert haben.

Ein weiterer Dank geht zudem an meine Kollegen aus dem technischen Bereich. Stefan Evers, Rainer Lehmann und Frank Peschel, die in der praktischen Umsetzung mit ihrer Erfahrung immer die besten Ergebnisse ermöglichten und die schlimmsten Schäden von vornherein zu vermeiden wussten.

Meinen studentischen Mitarbeitern möchte ich ebenfalls für Ihre Arbeit und Unterstützung danken.

Ich danke meinen Eltern Claudia und Joachim, meinen Großeltern Gabi und Manfred sowie meinem Onkel Michael. Sie alle haben mich während meiner Zeit an der Universität vom Beginn des Studiums bis zum Ende meiner Promotionszeit immer unterstützt und motiviert, aufgeheitert und angetrieben.

Ein besonderes Dankeschön möchte ich an meine Frau Susanne richten. Ich danke ihr für die Unterstützung und die Energie, die sie mir gegeben hat, egal wie gestresst oder demotiviert ich grade war. Durch sie konnte ich diesen Weg immer weiter gehen.

Kurzfassung

Die Erzeugung metallischer Pulver und die sich ergebenden Pulvereigenschaften sind besonders mit Blick auf neue Fertigungsverfahren, wie z.B. die metalladditive Fertigung mittels selektivem Laserschmelzen, hohen qualitativen Ansprüchen unterworfen. Um diese hohen Ansprüche an Zirkularität, Partikelgrößenverteilung und Fließfähigkeit erfüllen zu können, muss bei der Pulverproduktion ein hohes Maß an Prozessverständnis und -kontrolle vorhanden sein. Besonders die Einstellung der Partikelform sowie das Auftreten von Satellitenpartikeln stellen eine Herausforderung dar, da diese Eigenschaften einen deutlichen Einfluss auf die Fließfähigkeit und Verarbeitbarkeit von Metallpulvern haben.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Einfluss der Strömungsbedingungen in Metallzerstäubungsanlagen auf die Eigenschaften der erzeugten Metallpulver untersucht. Hierfür wurden an einer Metallzerstäubungsanlage Pulver mit verschiedenen Strömungsbedingungen erzeugt. Zur Zerstäubung wurde ein Close-Coupled-System mit Stickstoff verwendet. Betrachtet wird ein rein axialer Strömungszustand, sowie Strömungen mit tangential eingeleitetem Hilfsgas. Die erzeugten Pulver werden anschließend qualitativ mittels Rasterelektronenmikroskopie, dynamischer Partikelbildanalyse und Laserbeugungsspektrometer analysiert. Wichtige Kenngrößen der Pulver sind hier die Zirkularität, die Partikelgrößenverteilung und das qualitative Auftreten von Satelliten.

Parallel zu den experimentellen Untersuchungen wird mittels CFD-Modellierung die Strömung innerhalb von Sprühkammern betrachtet. Hierbei wird im ersten Schritt der Einfluss von Kammergeometrie und Gaseinleitung auf die Strömungsstruktur analysiert. Im Anschluss wird der Einfluss der Strömungsstrukturen auf die Trajektorien von Partikeln mit verschiedenen Durchmessern mittels zweiphasiger Simulation untersucht. Durch eine Verweilzeitbetrachtung der Partikel innerhalb der Rezirkulationszone in der Sprühkammer wird hierbei die Rezirkulationsneigung unterschiedlicher Partikel bei verschiedenen Strömungszuständen analysiert und mit Hilfe der Bodenstein-Zahl als Anlagenkenngröße bewertet.

Durch den Einsatz des tangentialen Hilfsgases konnte die erreichte Zirkularität der Partikel mit einem Partikeldurchmesser von $d_p > 10 \mu m$ um bis zu 10 % gesteigert werden. Entsprechende Verbesserungen lassen sich ab einem Tangentialgas / Zerstäubergas-Verhältnis größer 1,75 erreichen. Zudem konnte durch eine Korrelation der Zirkularität mit der Bodenstein-Zahl gezeigt werden, welche Auswirkungen die Änderungen der Strömung auf das Rückvermischungsverhalten hat. Gerade im Bereich der Partikel mit $d_p < 15 \mu m$ konnte eine bessere Abscheidung aus der Sprühkammer erreicht werden. Dies lässt zudem darauf schließen, dass die Bildung von Satellitenpartikeln reduziert wurde, da die Partikel in geringerer Zahl rezirkuliert werden und somit eine Satellitenbildung durch Kollisionseffekte vermindert wird. Die Betrachtung der Partikelgrößenverteilung zeigt ebenfalls, dass ein Einfluss des Strömungsfeldes vorliegt. Der Einsatz von tangentialem Hilfsgas führt zu einer Verschiebung zu kleineren Partikelgrößen. Dieses Verhalten deckt sich mit der verminderten Teilnahme von kleinsten Partikeln an Kollisionen und der Bildung von Satelliten. Der Anteil der Partikelfraktion mit $d_p \ll 10 \mu m$ findet sich in der Partikelgrößenverteilung messbar wieder und geht nicht als aggregierte Partikel auf deutlichen größeren Partikeln in der PGV-Messung verloren.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein neuartiger Ansatz zur Beschreibung der Rezirkulationsneigung der Partikel mit Hilfe der Bodenstein-Zahl als Anlagenkenngröße vorgestellt, die allein durch Simulationen zur Anlagenauslegung und Einstellung der späteren Pulvereigenschaften verwendet werden kann. Zudem konnte gezeigt werden, dass die Möglichkeit besteht, das Auftreten von Satellitenpartikeln mittels der Partikelgrößenverteilung zu analysieren und so Änderungen am Sprühprozess bzgl. des Einflusses auf die Satellitenbildung zu bewerten. Die experimentellen Untersuchungen mit tangentialem Hilfsgas zeigen zudem auf, ab welchen Einsatzmengen an Gas eine Verbesserung an den Partikeleigenschaften zu erkennen ist. Damit liefert diese Arbeit Hilfsmittel zur Anlagenauslegung bei der Metallpulvererzeugung mit Sprühverfahren, um die Einstellung von Partikeleigenschaften zu ermöglichen.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Einleitung und Zielsetzung | 1 |
| 2 | Stand der Technik | 3 |
| 2.1 | Zerstäubung metallischer Schmelzen | 3 |
| 2.1.1 | Kammerströmung | 7 |
| 2.1.2 | Partikelmorphologie und ihre Auswirkungen | 11 |
| 2.1.3 | Formfaktoren | 13 |
| 2.2 | Partikel in Strömungen | 15 |
| 3 | Grundlagen | 18 |
| 3.1 | Kammerströmung | 18 |
| 3.1.1 | Freistrah | 18 |
| 3.1.2 | Einfluss der Berandung | 20 |
| 3.1.3 | Partikelverhalten in Strömungen | 21 |
| 3.2 | Zerstäubung metallischer Schmelzen | 23 |
| 4 | Methodiken der Arbeit | 33 |
| 4.1 | Modellierung und Simulation | 33 |
| 4.2 | Pulvererzeugung und Analyse | 33 |
| 4.2.1 | Versuchsanlage | 34 |
| 4.2.2 | Beugungsspektrometrie | 37 |
| 4.2.3 | Optische Partikelbildanalyse | 38 |
| 5 | Modellierung | 39 |
| 5.1 | Geometrie und Annahmen | 39 |
| 5.2 | Solverauswahl und Turbulenzmodell | 40 |
| 5.3 | Vernetzung | 41 |
| 5.4 | Sensitivitätsanalyse | 42 |
| 5.5 | Partikelphase | 44 |

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|--|-----|
| 6 | Experimentelle Ergebnisse | 47 |
| 6.1 | Anlagenparameter | 47 |
| 6.2 | Strömungsmessungen | 49 |
| 6.3 | Sprühversuche | 52 |
| 7 | Simulationsergebnisse | 61 |
| 7.1 | Modellvalidierung | 61 |
| 7.2 | Einfluss der Sprühkammergeometrie | 64 |
| 7.3 | Variation des Zerstäubungsdrucks | 65 |
| 7.4 | Variation des H/D-Verhältnisses | 66 |
| 7.5 | Hilfsströmung | 82 |
| 7.6 | Partikelbeladene Strömung | 85 |
| 7.6.1 | Partikelübergang in Rezirkulationszone | 86 |
| 7.6.2 | Partikeltrajektorien ohne Zusatzgas | 88 |
| 7.6.3 | Partikeltrajektorien mit Tangentialgas | 94 |
| 7.7 | Verweilzeitverhalten der Partikel | 96 |
| 8 | Zusammenfassung, Fazit und Ausblick | 124 |
| | Literaturverzeichnis | 135 |
| | Abbildungsverzeichnis | 141 |
| | Nomenklatur | 142 |
| | Anhang | 145 |
| | Eigene Veröffentlichungen | 151 |
| | Betreute Arbeiten | 152 |