

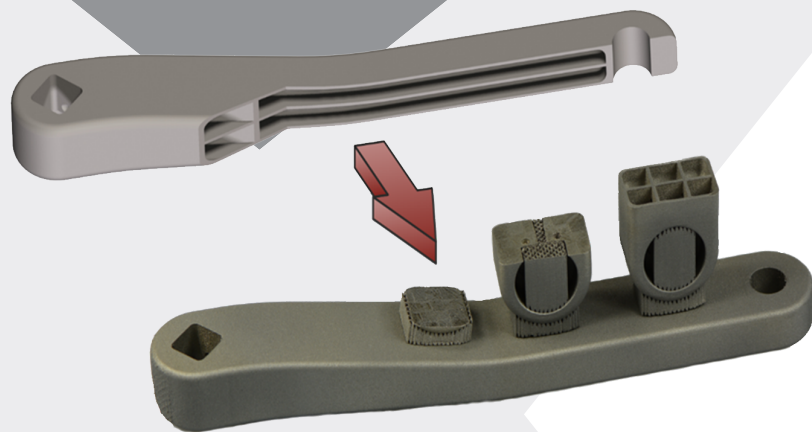


DVM

Deutscher Verband für
Materialforschung und -prüfung e.V.

3. Tagung des DVM-Arbeitskreises
Additiv gefertigte Bauteile
und Strukturen

**Additiv gefertigte Bauteile
und Strukturen**





DVM

Deutscher Verband für
Materialforschung und -prüfung e.V.

Bericht 403

Additiv gefertigte Bauteile und Strukturen

3. Tagung des Arbeitskreises
Additiv gefertigte Bauteile und Strukturen
07. und 08. November 2018, Berlin

Obmann: *Prof. Dr.-Ing. Hans Albert Richard,*
Universität Paderborn

DI LVERCHARAKTERISIERUNG MITTELS INSTRUMENTELLER ANALYTIK – POWDER GENETICS©

T. Näke, M. Eiber

IABG, Ottobrunn

Zusammenfassung:

Die optimale Prozessierbarkeit des Ausgangswerkstoffs ist eine wesentliche Voraussetzung für den stabilen und reproduzierbaren Herstellprozess von Bauteilen mit additiven Fertigungsverfahren. Elementare Kenngrößen und Eigenschaften eines Pulvers haben einen wesentlichen Einfluss auf den Fertigungsprozess und auf die resultierenden Bauteileigenschaften. In der Praxis kommen zahlreiche chemische und physikalische Untersuchungen zum Einsatz, um Merkmalsgrößen zu bestimmen und Pulverqualitäten zu bewerten. Dieser Beitrag beschreibt die konventionelle Vorgehensweise mit den verwendeten, klassischen Analyseverfahren und zeigt deren Unsicherheiten und Risiken auf. Darüber hinaus wird ein Verfahren vorgestellt, welches auf der Anwendung weniger Methoden der instrumentellen Analytik basiert und die Grundlage für eine standardisierte Pulvercharakterisierung darstellt.

Stichwörter: PowderGenetics©, Pulvercharakterisierung, instrumentelle Analytik, Computertomografie

POWDER CHARACTERIZATION USING INSTRUMENTAL ANALYSIS – POWDER GENETICS©

Abstract:

A requirement for the stable and reproducible manufacturing process of components with additive manufacturing processes is a best possible processability of the powder material. The elementary parameters and the properties of a powder have a significant influence on the resulting component properties. Numerous chemical and physical investigations are used to determine characteristic parameters and to evaluate powder qualities. This paper describes the conventional procedure with the classical analysis methods used and points out their uncertainties and risks. In addition, a method will be presented, which is based on the application of a few methods of instrumental analysis and which represents the foundation for a standardized powder characterization.

Keywords: PowderGenetics©, powder characterization, instrumental analytics, computed tomography

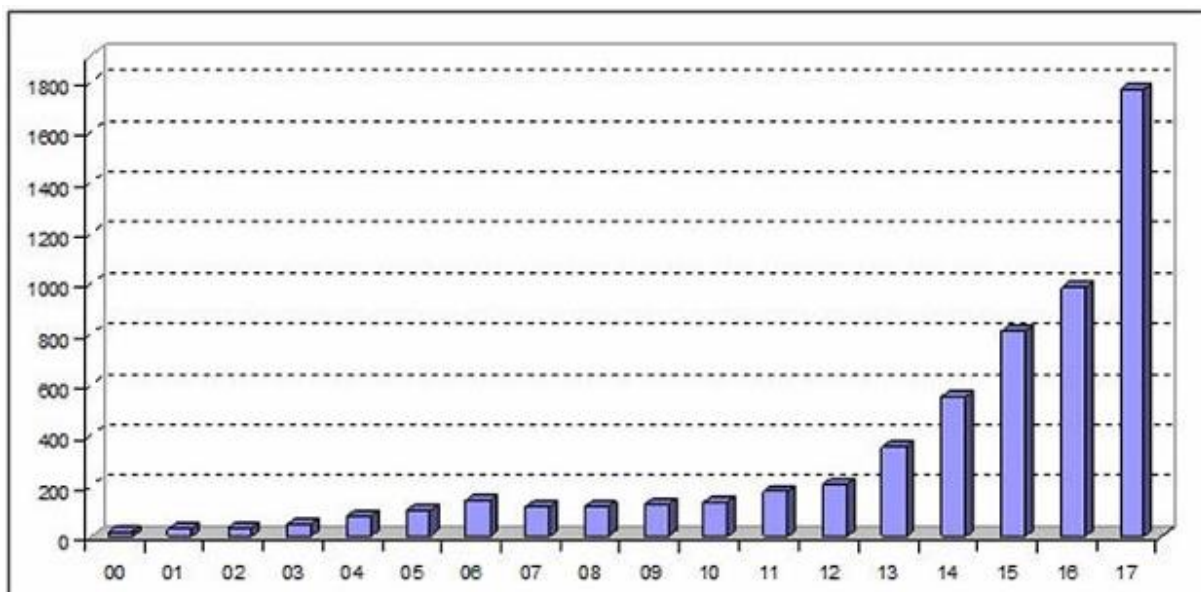
Einleitung

Der Wirtschaftszweig der additiven Fertigung weist in den letzten Jahren hohe Wachstumsraten von ~ 20 % pro Jahr auf [1]. Dementsprechend vergrößert sich der Markt mit dessen Teilnehmern und Produkten. Der in den letzten Jahren beobachtbare, signifikante Anstieg verkaufter AM-Systeme [2] lässt auf ein Wachstum schließen, welches weit über die derzeitige Zunahme an additiv gefertigten Produkten hinausgeht. Die Einschätzungen reichen von einer variablen Ergänzung konventioneller Produktionsmethoden bis hin zu Zukunftsvisionen, in denen eine weitgehende Verdrängung der etablierten Fertigungstechnologien erfolgt. Mögliche gesellschaftliche und ökonomische Auswirkungen wurden zum Beispiel in einer Innovationsanalyse des KIT, ITS untersucht [3].

Branche	CAGR* bis 2030	Marktvolumen, global, 2015 (in Mrd. €)	Marktvolumen, global, 2030 (in Mrd. €)
Luft- und Raumfahrt	23%	0,43	9,59
Medizintechnik	23%	0,26	5,59
Automobilbranche	15%	0,34	2,61
Industrie	14%	0,44	2,98
Einzelhandel	13%	0,30	1,89

*Compound Annual Growth Rate (durchschnittliches jährliches Wachstum)

Abbildung 1: Wachstumsaussichten AM-Produkte [1]



Dramatic rise in metal AM system sales

Source: Wohlers Report 2018

Abbildung 2: Anzahl der verkauften AM-Systeme [2]

Hohe Produktmengen erfordern eine effiziente und standardisierte Fertigung über stabile und repräsentative Prozesse, die in Produkten resultieren, welche werkstoffübergreifend unterschiedlichsten Qualitätsanforderungen genügen müssen. Neben optischen und haptischen Kriterien werden vor allem Festigkeitseigenschaften verlangt. Neben statisch beanspruchten und nicht sicherheitsrelevanten Bauteilen, werden vor allem im Metallbereich zunehmend Bauteile gefertigt, die in der Anwendung zyklische Beanspruchungen erfahren, für die eine hohe Schwingfestigkeit erforderlich ist. Fertigungstechnisch wird diese maßgeblich durch die Oberflächengüte und randnahe Defekte bestimmt, die in additiven Fertigung nicht nur prozessbedingt sind, sondern durch die Eigenschaften des Pulvers signifikant beeinflusst werden.

Eine Charakterisierung der eingesetzten Pulver bezüglich ihrer elementaren Kenngrößen ist demnach eine wesentliche Voraussetzung für einen stabilen und reproduzierbaren Bauprozess und für die daraus resultierende Bauteilqualität. Derzeitig eingesetzte Verfahren sind zahlreich und stellen häufig nur eine einzelne Merkmalsgröße und diese als Summenparameter dar.

Qualitätsrelevante Pulvereigenschaften

Innerhalb der Prozesskette eines additiven Fertigungsverfahrens ist eine hohe Aussagekraft hinsichtlich der Prozessierbarkeit von Pulvern, sowie die Möglichkeit der Korrelation von Pulverkenngößen zu erzeugter Bauteilqualität von wesentlicher Bedeutung. Dies bedingt eine Pulvercharakterisierungsmethode mit der elementare Kenngrößen sowohl qualitativ, als auch quantitativ erfasst und statistisch abgesichert ausgewertet werden. In der Abbildung 3 sind die qualitätsrelevanten Eigenschaften und Kenngrößen eines Metallpulvers dargestellt.

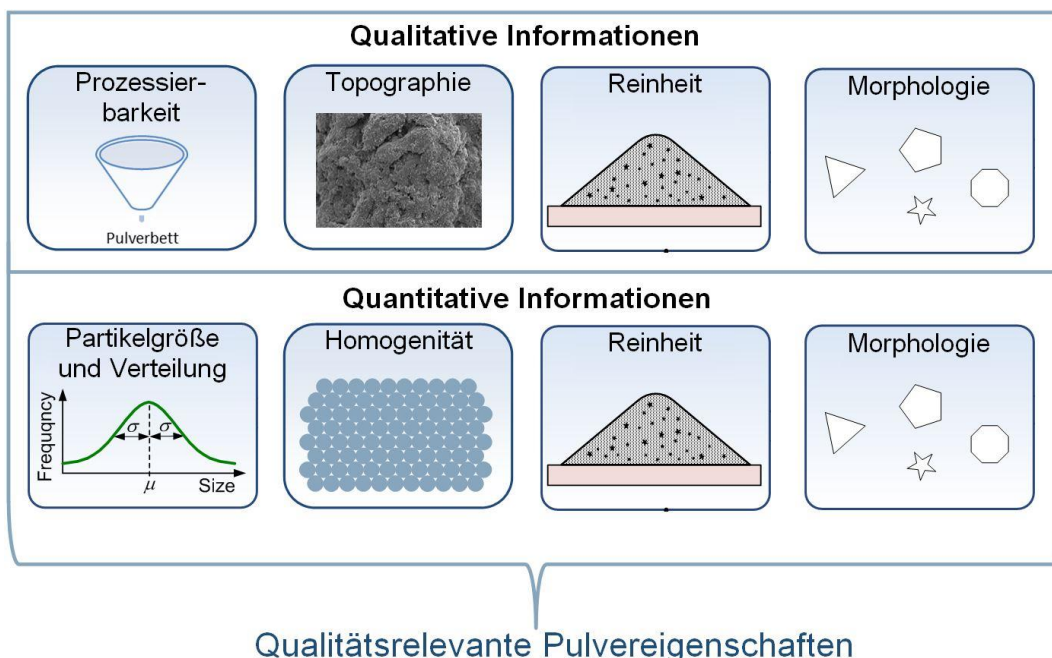


Abbildung 3: Darstellung der wesentlichen Pulvereigenschaften und Kenngrößen

Konventionell eingesetzte chemische und physikalische Methoden (Auswahl)

Dichtebestimmung

Die absolute Dichtebestimmung [4] von Pulvern erfolgt pyknometrisch. Dazu wird die Masse der Pulverprobe und des mit einer Flüssigkeit befüllten Pyknometers durch Wägen ermittelt. Anschließend wird in das entleerte Pyknometer die zu untersuchende und gewogene Pulverprobe eingegeben, mit Wasser aufgefüllt und erneut gewogen. Aus der Masse des durch die Probe verdrängten Wassers und dessen Dichte ergibt sich das durch das Pulver verdrängte Volumen. Die Masse der Pulverprobe wird durch das Volumen der Probe dividiert, um die absolute Dichte des Pulvers zu erhalten.

Die Schüttdichte [5] wird ermittelt, indem 100 ml der Pulverprobe durch einen Trichter in einen definierten Becher gegeben werden. Dieser wird von überstehendem Pulver befreit, so dass das Pulver mit der Becherwand abschließt. Anschließend wird die Masse des im Zylinder befindlichen Pulvers bestimmt und durch dessen Volumen dividiert, um die Schüttdichte zu erhalten.

Die Klopfdichte [6] wird über einen graduierten Messzylinder bestimmt, welcher mit der gewogenen Pulverprobe befüllt ist. Über eine Hubvorrichtung wird verdichtet bis keine Veränderung mehr eintritt und der statische Zustand erreicht ist. Die Klopfdichte ist durch die Division der Masse durch das Volumen zu bestimmen.

Die beschriebenen Dichten stellen Summenparameter dar, die von der chemischen Zusammensetzung, den in den Partikeln enthaltenen Hohlräumen und etwaig vorhandenen Verunreinigungen abhängig sind. Die jeweilige Partikelgrößenverteilung und Morphologie der Partikel gehen maßgeblich in die Klopff- und Schüttdichte ein. Für den Prozess der additiven Fertigung haben die so ermittelten Dichten wenig Relevanz. Die Schüttdichte wird standardmäßig angewendet um die für den Bauprozess notwendige Pulvermenge zu ermitteln.

ICP-OES (inductively coupled plasma optical emission spectrometry)

Mittels einem induktiv gekoppeltem Plasma [7] erfolgt die Bestimmung ausgewählter Elemente durch optische Emissionsspektrometrie. Das zu untersuchende Pulver wird in einer wässrigen Lösung aufgeschlossen. Die enthaltenen analysierbaren Elemente werden durch ein Argonplasma geführt und angeregt, wodurch sie Photonen emittieren welche im Anschluss durch ein Spektrometer vermessen werden.

Die ICP-OES-Analyse wurde entwickelt, um Elemente im Spurenbereich zu analysieren. Hohe Konzentrationen führen infolge von Interferenzen und einer nichtlinearen Kalibration über mehrere Potenzen zu ungenauen Quantifizierungen. Zudem ist es gängige Praxis, lediglich die Elemente der jeweiligen Werkstoffbezeichnung gezielt zu analysieren. Im Pulver etwaig vorhandenes Fremdmaterial und Verunreinigungen bleiben daher unentdeckt.

Fließgeschwindigkeit

Die Fließgeschwindigkeit [8] wird mit einem Hall-Flow-Meter, Gustavsson Flowmeter, Carney Funnel oder Scott Volumeter ermittelt. Hierzu wird die Pulverprobe in einen genormten Trichter mit Öffnung gegeben. Es wird die Zeit bestimmt, in der das Pulver den Trichter durchlaufen hat.

Die ermittelte Fließgeschwindigkeit eines Pulvers stellt dabei wiederum einen Summenparameter dar, der abhängig ist von der Partikelgröße, dem Wassergehalt

und der Temperatur. Wie aus der Abbildung 4 ersichtlich ist, folgt die Fließgeschwindigkeit keiner linearen Abhängigkeit der genannten Parameter. Sehr feine Pulver mit geringen Korngrößen weisen zum Beispiel keine Fließfähigkeit auf.

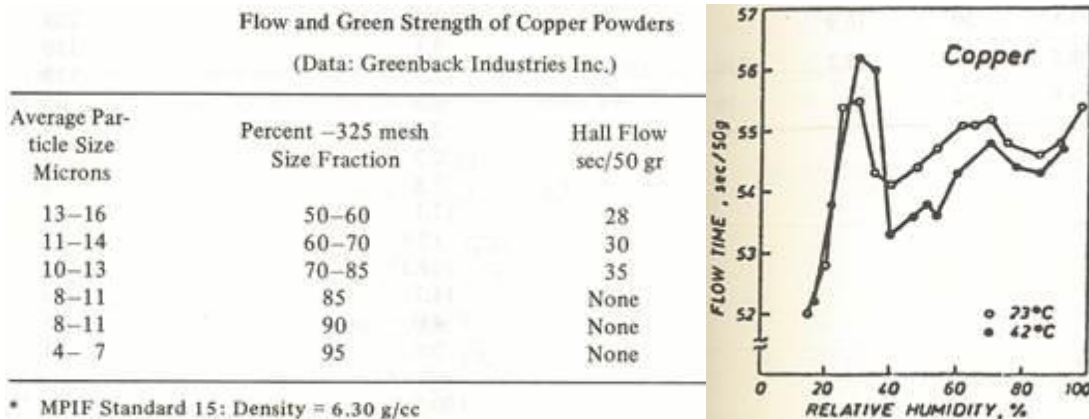


Abbildung 4: Einfluss der relativen Luftfeuchte und Temperatur auf die Fließgeschwindigkeit von Kupferpulvern [9]

Partikelgrößenbestimmung

Die Partikelgrößenverteilung wird überwiegend mit einem Lasergranulometer [10] ermittelt. Die Pulverprobe wird in einer Flüssigkeit dispergiert und an einer monochromatischen Lichtquelle vorbeigeleitet (i.d.R. einem Laser). Die Streuung des Lichtes durch die Partikel wird von Detektoren erfasst. Die sich ergebenden Beugungsmuster sind abhängig von der Partikelmorphologie, den optischen Eigenschaften des Materials und können die wahren Größen und Formen verfälschen. Zweidimensional erfasste Beugungsmuster bilden die Basis für eine mathematische Auswertung, daher kann eine verlässliche Aussage über die Partikelgröße nur bei idealen Kugeln mit bekannten optischen Eigenschaften erfolgen.

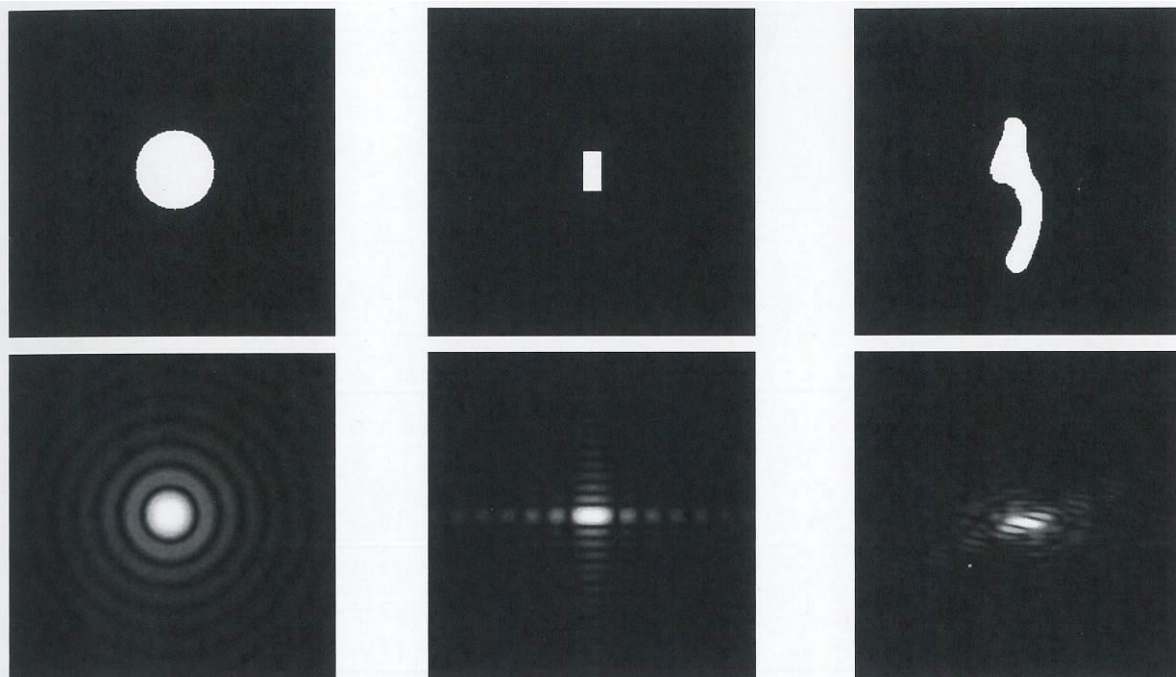


Abbildung 5: Streumuster von Partikeln unterschiedlicher Morphologie (simulierte Bilder) [10]

Fazit zu konventionellen Methoden

Die Ergebnisse der beschriebenen chemischen und physikalischen, konventionell eingesetzten Untersuchungsmethoden von Pulvern stellen häufig Summenparameter und keine elementaren Kennwerte dar. Die erzeugten Summenparameter setzen sich aus den methodenspezifischen Prüfbedingungen und den Eigenschaften des Pulvers zusammen, die nicht mehr aufgeschlüsselt werden können. Alle konventionell eingesetzten Methoden basieren zudem auf einer zweidimensionalen Betrachtung und sind deswegen von signifikanten Unsicherheiten bezüglich der Messgenauigkeit betroffen. Bei einer lichtmikroskopisch untersuchten Schliifprobe werden die Informationen der Partikelstrukturen und der in Partikel häufig enthaltenen Hohlräume ausschließlich als Information einer Ebene ermittelt. Diese zweidimensionale Betrachtung birgt ein hohes Risiko der Fehlinterpretation von Morphologien und geometrischen Ausdehnungen. Aufgrund der geringen Stichprobe ist darüber hinaus eine Übertragung der Ergebnisse auf die vorliegende Pulvercharge deutlich fehlerbehaftet. Lasergranulometrisch ermittelte Partikelgrößen beziehen sich auf Ausdehnungen von Projektionen der Partikel und stellen bei nicht ideal runden Partikeln verfälschte Abmessungen dar. In der chemischen Analyse besteht bei Anwendung des Standardverfahrens ICP/OES ein hohes Risiko, dass etwaig vorhandene Verunreinigungen nicht erfasst werden. Die sehr häufig angewandte Bestimmung diverser Dichten weist eine mangelhafte Aussagekraft hinsichtlich der Prozessfähigkeit von Metallpulvern auf. Für die Durchführung konventioneller Methoden in umfangreicher Anzahl werden große Mengen an Pulvern benötigt. Je nach Werkstoffzusammensetzung werden Gewichte bis zu 750 g angenommen, was in Hinblick auf den Materialwert vor allem bei der Charakterisierung von Pulvern aus Edelmetallen einen signifikanten Kostenfaktor darstellt.

Ableitung eines standardisierten Verfahrens - PowderGenetics©

Unter Berücksichtigung wirtschaftlicher, zeitlicher und anwendungstechnischer Aspekte wurde eine Verringerung der eingesetzten Verfahren und der benötigten Untersuchungsgeräte angestrebt. Für die realitätsgetreue Beschreibung von Pulvereigenschaften ist es wichtig, Untersuchungen über dreidimensionale Betrachtungen durchzuführen, die in der Bestimmung elementarer Kenngrößen resultiert. Idealerweise bilden qualitative Informationen eine komplementäre Ergänzung zu quantitativen Informationen, welche eine statistische Absicherung von Ergebnissen gewährleisten. Darüber hinaus wurde die Möglichkeit einer Automatisierung der Auswertung für einen zukünftigen Einsatz der Methodik im Bereich der Serienprüfung berücksichtigt.

Die entwickelte Pulvercharakterisierung umfasst die Anwendung von vier Einzelverfahren zur ganzheitlichen Betrachtung aller relevanten Pulvereigenschaften (Abbildung 6). Ab einer Pulvermenge von ca. 20 g werden statistisch abgesicherte Ergebnisse ermittelt, bewertet und analog zu prozessrelevanten Vorgaben wie zum Beispiel die geplante Schichthöhe in Pulverklassen eingeteilt. Im Folgenden werden die angewandten Einzelverfahren als Bestandteile der Pulvercharakterisierung vorgestellt.

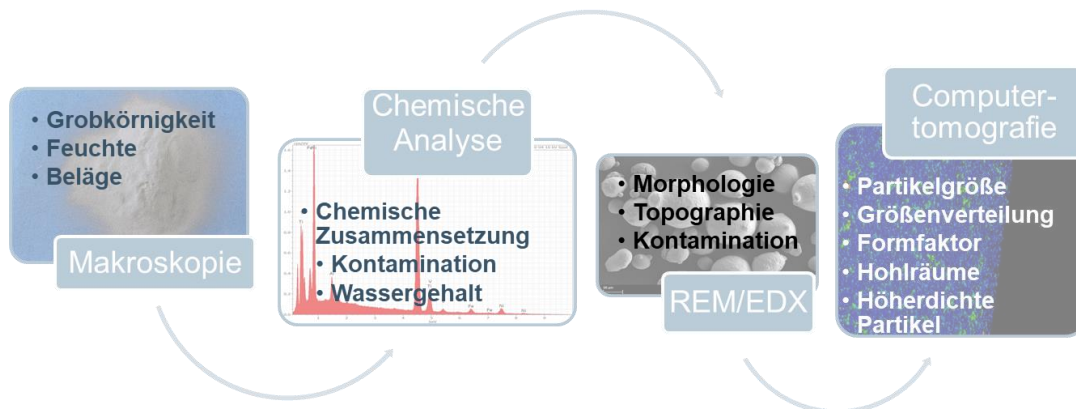


Abbildung 6: PowderGenetics, eingesetzte Verfahren und ermittelbare Merkmale im Ablaufschema

Makroskopie

Die makroskopische Betrachtung aufgeschütteter Pulver ermöglicht einen ersten Überblick über die Beschaffenheit der Probe. So können mehrere Pulverproben hinsichtlich ihrer Körnigkeit und etwaig vorhandener Beläge verglichen werden. Mangelndes Rieseln und grobe Agglomerate weisen auf eine vorliegende Feuchtigkeit hin. Das Verfahren liefert häufig erste Hinweise auf unzulässige Auffälligkeiten, die zu einem vorzeitigen Ausmustern eines Pulvers führen können, womit die Aufwände für die weiterführenden Analysen eingespart werden.

Chemische Zusammensetzung

Röntgenfluoreszenzanalyse

Die Pulverprobe wird in einer Boratschmelze aufgeschlossen und mit polychromatischer Röntgenstrahlung angeregt. Dabei werden Elektronen von den inneren Schalen des Atoms herausgeschlagen. Elektronen aus höheren Energieniveaus fallen auf die niedrigeren Niveaus zurück. Die dabei freiwerdende Energie wird in Form einer elementspezifischen Fluoreszenzstrahlung abgegeben, die von einem Strahlungsdetektor erfasst und anschließend ausgewertet wird [12]. Die Röntgenfluoreszenzanalyse stellt über mehrere Potenzen eine lineare Kalibration sicher und bestimmt alle Elemente mit einer größeren Ordnungszahl als Natrium. Etwaige Verunreinigungen der Pulverprobe können somit erkannt und bestimmt werden, sofern diese nicht in sehr geringen Spuren unterhalb der Nachweisgrenze (elementabhängig ~ 1 ppm) liegen.

Trägergasheißextraktion

Durch Analysatoren werden die Gehalte an Sauerstoff, Stickstoff, Wasserstoff, Kohlenstoff und Schwefel ermittelt [13, 14, 15]. Die Pulverprobe wird in ein Reaktionsgefäß gegeben und induktiv in einem Gasstrom über die Schmelztemperatur aufgeheizt. Die dadurch freigesetzten Gase werden durch nachgeschaltete Messzellen mit einer Genauigkeit von ~ 1 ppm quantifiziert.

Karl-Fischer-Titration

Das enthaltene Wasser einer Pulverprobe wird durch das Aufheizen in einem Ofen über eine Gaseinleitung in ein Reagenz geleitet. Der Wassergehalt wird anschließend durch die Reaktion mit coulometrisch erzeugtem Iod bestimmt [16].

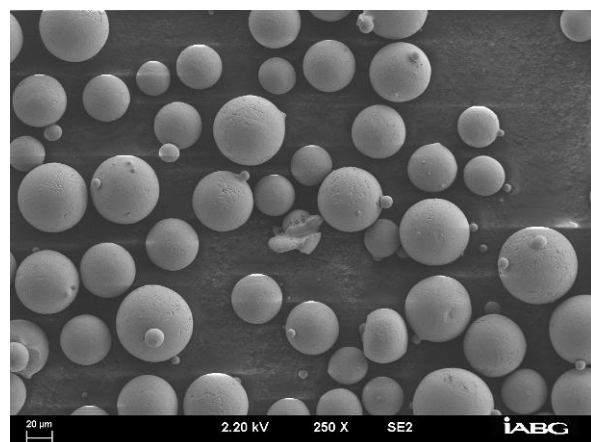
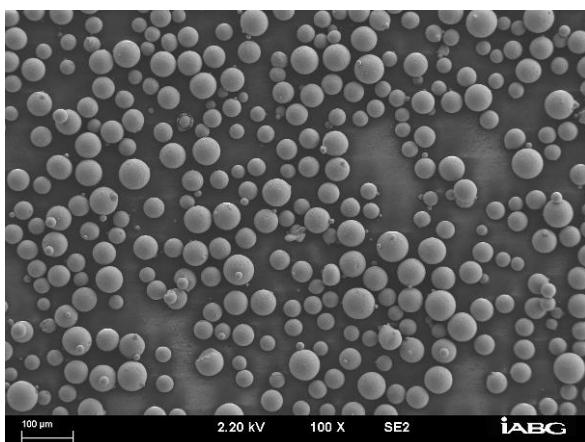
Die Einhaltung der chemischen Zusammensetzung stellt ein notwendiges Kriterium der Pulverqualität dar. Bei fehlender Einhaltung von Sollvorgaben durch Über- und/oder Unterschreitungen von Grenzwerten kann das Pulver vorzeitig zurückgestellt, aufbereitet, oder für die Herstellung von Bauteilen mit geringeren Qualitäts- und Festigkeitsvorgaben verwendet werden.

Rasterelektronenmikroskopie

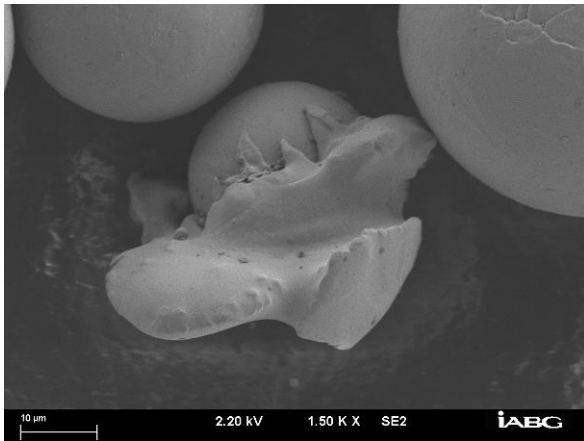
Die Rasterelektronenmikroskopie [17] basiert auf der Abrasterung einer Probenoberfläche durch einen Elektronenstrahl. Der Primärstrahl erzeugt auf der Probenoberfläche Wechselwirkungen in Form von Rückstreuелеktronen, Sekundärelektronen und emittierten Photonen. Damit können sowohl Topografie- als auch Materialkontraste dargestellt werden (Abbildungen 7 bis 12). Die durch die Wechselwirkung des Primärstrahles mit den Elektronen der Probe emittierten Röntgenquanten werden in der Mikrobereichsanalyse genutzt, um die elementare Zusammensetzung der Probe zu bestimmen.

An wenigen Pulverpartikeln einer Probe werden Topografieuntersuchungen durchgeführt, um qualitative Aussagen über die im Pulver enthaltene Morphologie, die Oberflächenstruktur und etwaige Kontamination zu erhalten. Unter hohen Vergrößerungen werden kleinste Anhaftungen, Subpartikel (Satelliten) und Beläge (Oxide) detektierbar, deren Präsenz und Anteil entsprechende Schlussfolgerungen auf das Verhalten des Pulvers im Bauprozess zulassen. Erfahrungsgemäß nimmt zum Beispiel die Prozessierbarkeit des Pulvers mit zunehmender Oberflächengüte aufgrund zunehmender Wirkung elektrostatischer Effekte ab, weshalb leicht raue, dendritische Strukturen ideal runder Formen angestrebt werden. Diese bilden die optimale Voraussetzung für einen gleichmäßigen Auftrag der Pulver durch den Beschichter, während entartete Strukturen und Anhaftungen zur Störung der Homogenität führen.

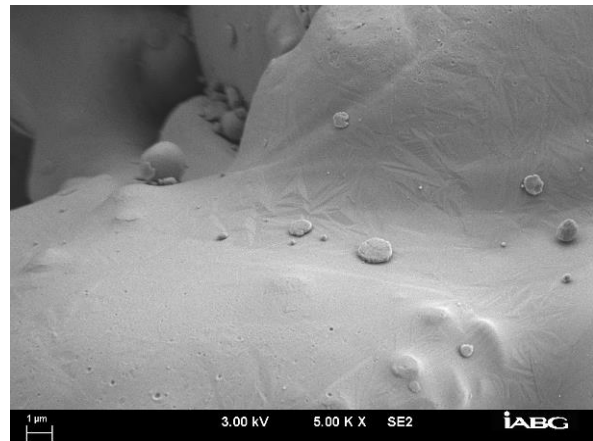
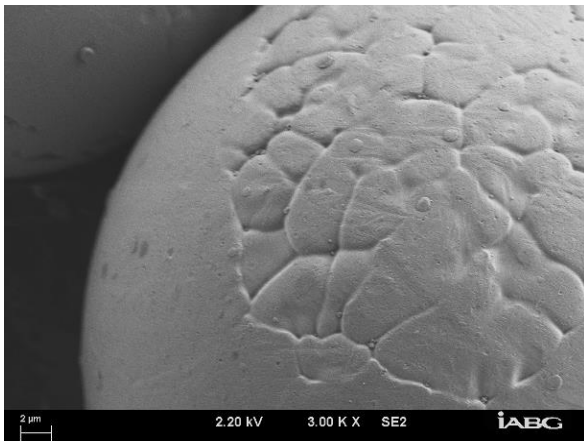
Durch rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen lassen sich die Partikelgröße, Morphologie, Topografie und die lokale elementare Zusammensetzung qualitativ bestimmen. Quantitative Aussagen sind nicht möglich bzw. wirtschaftlich nicht realisierbar, da diese einen sehr hohen Zeitaufwand bedingen. Auch können über dieses Verfahren Verunreinigungen und Kontaminationen des Pulvers bestimmt werden. Durch eine entsprechende Probenvorbereitung ist hier eine Quantifizierung möglich.



Abbildungen 7 und 8: REM-Übersichtsaufnahmen der Pulverprobe



Abbildungen 9 und 10: REM-Aufnahmen entarteter Partikel



Abbildungen 11 und 12: REM-Detailaufnahmen der Topografien von Partikeln, dendritische und glatte Strukturen

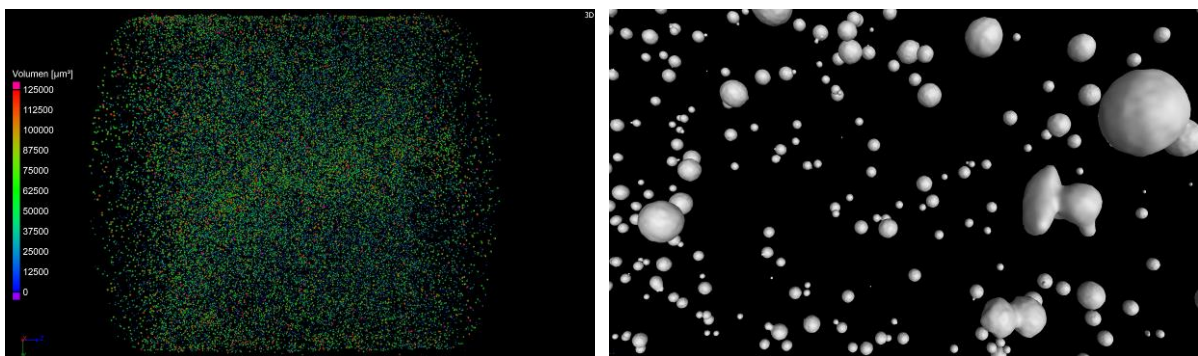
Computertomografie

Bei der Computertomografie [18] wird durch eine Röntgenröhre ein Bremsspektrum erzeugt, welches durch die im Strahlengang befindliche Probe teilweise absorbiert wird. Ein digitaler Detektor wandelt die transmittierte Röntgenstrahlung durch Szintillatoren in Elektronen und damit in eine Bilddarstellung um. Während die zu untersuchende Probe um 360° rotiert, werden zahlreiche 2D-Röntgenbilder erstellt, die im Anschluss in ein digitales Volumen umgewandelt werden. Die für die Detektion aller Partikelgrößen notwendige pulverspezifische Auflösung wird in der rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung ermittelt. Um eine statistisch abgesicherte Messung sicherzustellen, ist eine Mindestanzahl von $1E+5$ Partikeln zu analysieren. In der Tabelle 1 und den Abbildungen 13 bis 18 sind die Ergebnisse der beispielhaften Untersuchung eines Ti6Al4V-Pulvers dargestellt. Die Scanauflösung betrug hier $3\ \mu\text{m}$ (Voxelgröße).

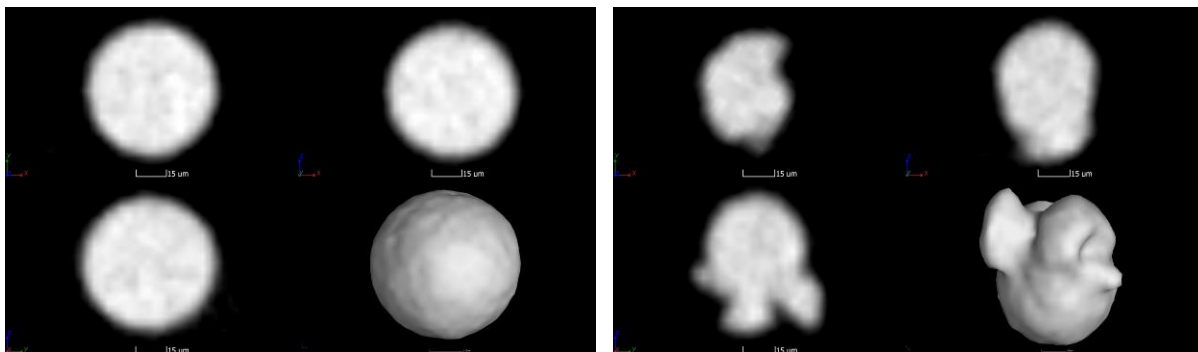
Mit der computertomografischen Untersuchung metallischer Pulver werden Hohlräume, höherdichte Verunreinigungen, Partikeloberflächen, Partikelgröße, Morphologie und deren Verteilungen quantitativ bestimmt.

Probe	Partikelgrößenverteilung in μm d10 / d50 / d90	Längenverhältnis 10 / 50 / 90	Sphärizität 10 / 50 / 90	Anzahl vermessener Partikel
Ti6Al4V	35,2 / 50,6 / 64,6	0,91 / 0,96 / 0,98	0,64 / 0,66 / 0,67	116137
Probe	Untersuchtes Partikelvolumen in μm^3	Anzahl der Hohlräume in den Partikeln	Volumen der Hohlräume in den Partikeln in μm^3	Gehalt der Hohlräume in den Partikeln in %
Ti6Al4V	4,4553E+09	1267	1.6285E+06	0,036
Probe	Untersuchtes Partikelvolumen in μm^3	Anzahl höher dichter Partikel	Volumen der höher dichten Partikeln in μm^3	Gehalt der höher dichten Partikel in %
Ti6Al4V	4,4553E+09	8	49493	0,0011

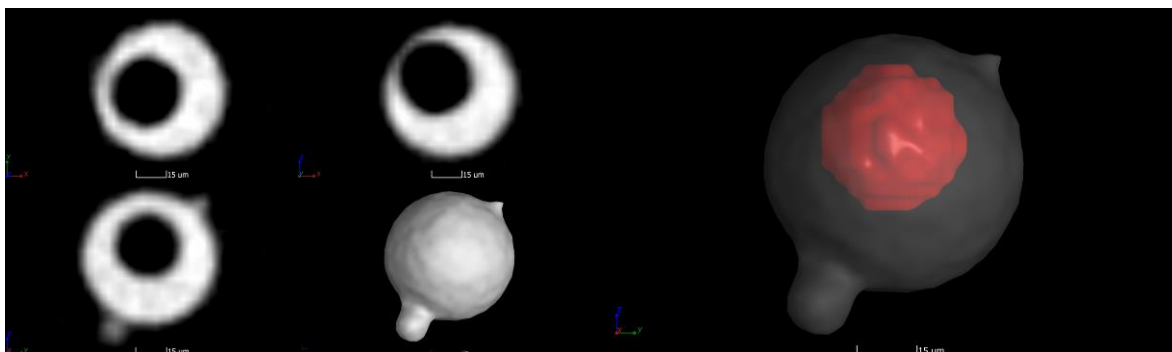
Tabelle 1: Ergebnis einer computertomografischen Untersuchung



Abbildungen 13 und 14: CT-Aufnahme der Pulverprobe als 3D-Bild mit Darstellung des Volumens in Falschfarben



Abbildungen 15 und 16: CT-Aufnahme einzelner Partikel, 3D-Bild rechts unten in den Bildern; Oben und links 2D Schnittbilder durch Partikel



Abbildungen 17 und 18: CT-Aufnahme eines Hohlräumes in einem Partikel; rechts unten 3D-Darstellung; Oben und links 2D Schnittbilder durch den Partikel; der Hohlraum wurde rot eingefärbt

Schlussfolgerungen und Ausblick

Es wurde eine Charakterisierungsmethode für metallische Pulver entwickelt, in der die Anzahl der eingesetzten Verfahren gegenüber einer konventionellen Charakterisierung reduziert werden konnte und die Informationstiefe der erhaltenen Ergebnisse durch dreidimensionale Betrachtungen und Bestimmung elementarer Kenngrößen signifikant gesteigert wurde. Die Verwendung einer kleinen Pulvermenge ist ausreichend, um statistisch abgesicherte Ergebnisse zu erzielen, die eine Grundlage bildet, um validierte Aussagen zur Prozessfähigkeit eines Pulvers und daraus erzeugbarer Bauteilqualitäten abzuleiten.

Auf Grundlage der elementaren Eigenschaften werden durch die Kombination von Ergebnissen Querverbindungen aufgezeigt, die vielfältige Möglichkeiten einer Korrelation unterschiedlicher Merkmalsgrößen erlauben. So kann beispielsweise der durch die chemische Analyse ermittelte Sauerstoffgehalt ins Verhältnis zu der tomografisch ermittelten Oberfläche der Partikelprobe gesetzt werden, um Alterungsprozesse durch Recyclingmaßnahmen zu verfolgen und zu bewerten.

In Abhängigkeit der Anforderungen des Fertigungsprozesses können material-, pulver- und pulverzuführungsspezifische Merkmale durch unterschiedliche Gewichtungen und Einstellung von Grenzwerten gezielt klassifiziert werden. Beispielsweise ist die Bewertung der Morphologie und der Partikelgröße eines Pulvers abhängig von der Schichthöhe des Druckprozesses. Mit steigender Partikelgröße nimmt der Einfluss der Morphologie zu und muss kritischer betrachtet und bewertet werden.

Die vorgestellte Methode repräsentiert die effiziente, ganzheitliche Betrachtung der wesentlichen Kenngrößen von Metallpulvern. In den nächsten Schritten wird der Einfluss einzelner Kenngrößen auf die Bauteilqualität hinsichtlich Oberflächengüte und Poren untersucht. Es wird angestrebt, eine Korrelation zwischen einzelnen Pulvermerkmalen und den mechanisch-technologischen Eigenschaften einer additiv gefertigten Probe herzustellen.

Literatur

- [1] Kliesing, Annabelle (31.01.2018, München): Strategy&-Analyse 3D-Druck: Marktvolumen für gedruckte Produkte steigt bis 2030 auf 22,6 Milliarden Euro. URL: www.strategyand.pwc.com/de/pressemitteilungen/3d-druck [19.08.2018]
- [2] Doris Zarre (28.03.2018): Wohlers Report 2018: Verkauf von Metall-3D-Druckern steigt um 80%. URL: <https://3druck.com/visionen-prognosen/wohlers-report-2018-verkauf-von-metall-3d-druckern-steigt-um-80-0069004> [19.08.2018]
- [3] Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS), TAB-Brief Nr. 48 Juni 2017, Innovationsanalyse: Additive Fertigungsverfahren
- [4] DIN EN ISO 18753:2018-01: Hochleistungskeramik - Bestimmung der absoluten Dichte keramischer Pulver mit einem Pyknometer. Berlin: Beuth, 2018
- [5] ISO 3923-1:2018-05: Metallpulver - Ermittlung der Füllichte - Teil 1: Trichterverfahren. Berlin: Beuth, 2018
- [6] ISO 3953:2011-02: Metallpulver - Bestimmung der Klopfdichte. Berlin: Beuth, 2011
- [7] DIN EN ISO 11885:2009-09: Wasserbeschaffenheit – Bestimmung von ausgewählten Elementen durch induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissionsspektrometrie (ICP-OES). Berlin: Beuth, 2009
- [8] ISO 4490:2018-04: Metallpulver - Bestimmung der Durchflussrate mit Hilfe eines kalibrierten Trichters (Hall flowmeter). Berlin: Beuth, 2018
- [9] Dr. Hausner, Henry H. und Dr. M. Kumar Mal, 1982. Handbook of Powder Metallurgy. Second Edition. New York (NY): Chemical Publishing Co. Inc., S. 56-57
- [10] ISO 13320:2009-10: Partikelmessung durch Laserlichtbeugung. Berlin: Beuth, 2009
- [11] DIN ISO 9277:2014-01: Bestimmung der spezifischen Oberfläche von Festkörpern mittels Gasadsorption - BET-Verfahren. Berlin: Beuth, 2014
- [12] DIN 51418-1:2008-08: Röntgenspektralanalyse - Röntgenemissions- und Röntgenfluoreszenz-Analyse (RFA) - Teil 1: Allgemeine Begriffe und Grundlagen. Berlin: Beuth Verlag, 2008
- [13] ASTM E1409-13: Standard Test Method for Determination of Oxygen and Nitrogen in Titanium and Titanium Alloys by Inert Gas Fusion. West Conshohocken (PA): ASTM International, 2013
- [14] ASTM E1447-09: Standard Test Method for Determination of Hydrogen in Titanium and Titanium Alloys by Inert Gas Fusion Thermal Conductivity/Infrared Detection Method. West Conshohocken (PA): ASTM International, 2016
- [15] ASTM E1941-10: Standard Test Method for Determination of Carbon in Refractory and Reactive Metals and Their Alloys by Combustion Analysis. West Conshohocken (PA): ASTM International, 2016
- [16] DIN 51777-2:1974-09: Prüfung von Mineralöl-Kohlenwasserstoffen und Lösungsmitteln; Bestimmung des Wassergehaltes, nach Karl Fischer, Indirektes Verfahren. Berlin: Beuth Verlag, 1974
- [17] Peter Fritz Schmidt und 13 Mitautoren: Praxis der Rasterelektronenmikroskopie und Mikrobereichsanalyse. Renningen: expert verlag, 1994
- [18] DIN EN 16016-2:2012-01: Zerstörungsfreie Prüfung - Durchstrahlungsverfahren - Computertomografie - Teil 2: Grundlagen, Geräte und Proben. Berlin: Beuth Verlag, 2012