

Einfluss von Sinterunterlagen auf den Bauteilverzug im Metal Binder Jetting-Prozess

Bauteilverzug im Metal Binder Jetting

H. Blunk, B.-F. Dettmar, A. Seibel

ZUSAMMENFASSUNG Ergänzend zu konventionellen sinterbasierten Verfahren wie dem Metal Injection Molding ermöglicht der Metal Binder Jetting-Prozess eine wirtschaftlichere Fertigung von Sinterbauteilen bei geringerer Stückzahl. Aufgrund unterschiedlicher Grünteileigenschaften liegen andere tribologische Eigenschaften und somit ein abweichender Bauteilverzug vor. Darüber hinaus ist derzeit nicht bekannt, wie sich dieser mit dem Zustand der Sinterunterlagen ändert. Ziel dieses Beitrags ist es daher, entsprechende Analysen vorzustellen und Handlungsempfehlungen aufzuzeigen.

STICHWÖRTER

Additive Fertigung, Keramik, Sintern

Influence of sintering bases on component distortion in the metal binder jetting process – Part distortion in metal binder jetting

ABSTRACT Complementing conventional sinter-based processes such as metal injection molding, the metal binder jetting process enables more economical production of sintered components in smaller quantities. Due to different green part properties, different tribological properties and thus different component distortion are present. Furthermore, it is currently not known how these change with the condition of the setter plate. The aim of this article is therefore to present corresponding analyses and to point out recommendations for action.

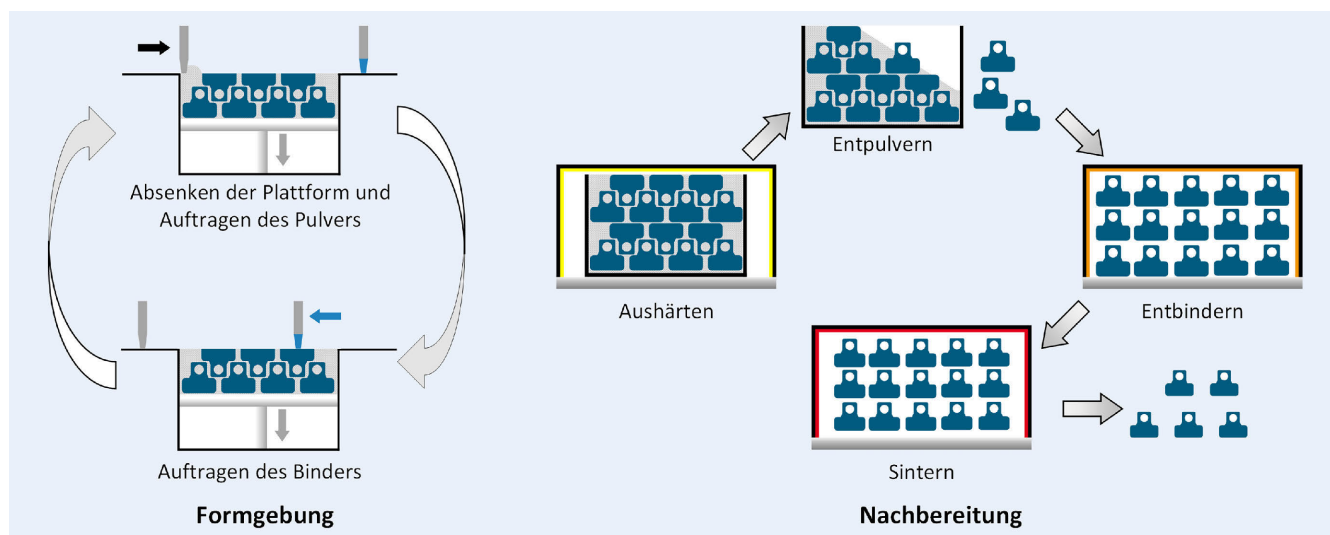


Bild 1. Metal Binder Jetting-Prozesskette. Grafik: Fraunhofer IAPT

1 Metal Binder Jetting

Als relativ junges additives Fertigungsverfahren erlaubt das Metal Binder Jetting (MBJ) die Herstellung hochkomplexer und detaillierter Bauteile aus Metall. Im Vergleich zu anderen additiven Verfahren wird dies durch eine hohe Präzision, die Vermeidung thermisch induzierter Defekte, eine hohe Fertigungsgeschwindigkeit und die Möglichkeit, eine breite Palette von Mate-

rialien zu verwenden, ergänzt [1]. Der eigentliche Formgebungsprozess zeichnet sich durch das schichtweise, selektive Auftragen von Bindemittel auf ein ebenes Pulverbett und das abschließende Sintern der Bauteile aus (Bild 1). Im Speziellen erfolgt ein Wechsel aus dem Auftragen einer Pulverschicht und dem Bedrucken mittels Bindemittel und abschließendem Absenken der Bauplattform, um die nächste Schicht Pulver aufzutragen. Anschließend wird der Binder im Ofen ausgehärtet, wodurch die Bauteile

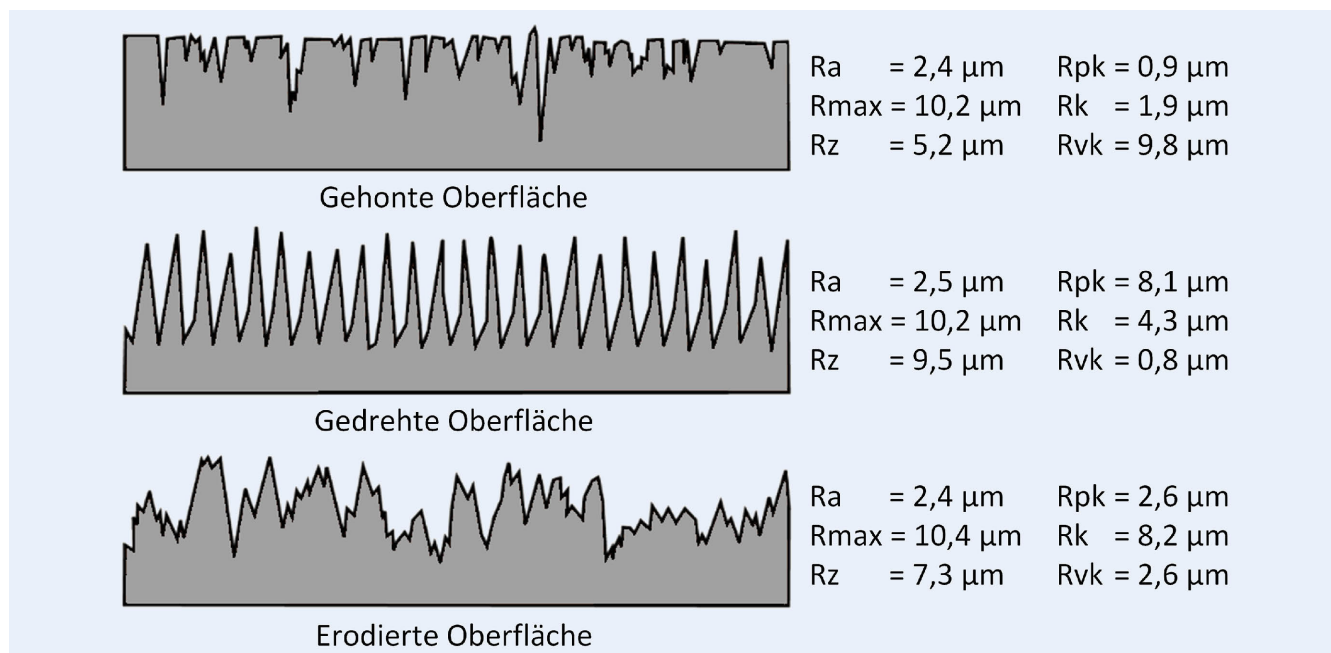


Bild 2. Kenngrößen unterschiedlich gefertigter Oberflächen, nach [6]. Grafik: Fraunhofer IAPT

sich verfestigen und somit entpulvert werden können. Je nach Prozessführung erfolgt schließlich eine thermische oder katalytische Entbinderung, woraufhin die Bauteile abschließend gesintert werden können. Dazu werden diese auf keramische Sinterunterlagen platziert. Nach Abschluss des Sintervorgangs können die Bauteile entweder direkt eingesetzt oder, sofern nötig, konventionell nachbearbeitet werden. Allerdings existieren beim Sintern derzeit noch einige Herausforderungen. So führen beispielsweise Reibung und Schwerkraft in Verbindung mit der hohen Temperatur zu unerwünschten Verzug der Bauteile [2].

Somit ist die Aufrechterhaltung der Formgenauigkeit während des gesamten Sinterprozesses derzeit eine der Schwierigkeiten, da Einflussfaktoren wie heterogene Porositätsverteilung, Reibung und Schwerkraft schwer zu beeinflussen sind [3]. Eine homogene Partikelverteilung sorgt zwar für eine gleichmäßigere Schrumpfung, diese ist aber weiterhin anisotrop [4, 5] und führt zu Relativbewegungen zwischen Bauteil und Sinterunterlage, wodurch Reibkräfte induziert werden, die der Schrumpfung entgegenwirken und schlussendlich zu einem ungewollten Verzug des Bauteils führen können. Diese bewirkt, je nach Art und Ausprägung, dass Bauteile nicht mehr verwendbar und Anpassungen entweder in der Konstruktion oder der Prozessführung erforderlich sind. Allerdings ist es möglich, ein geeignetes Bauteildesign beispielsweise iterativ zu entwickeln, indem nach erfolgter Fertigung das Bauteil analysiert, auf Basis der Ergebnisse in seiner Form angepasst und abschließend erneut gefertigt wird. Ist ein stabiles Bauteildesign gefunden, gilt es diesen Zustand beizubehalten. Dazu zählen neben einer konstanten Grünteildichte auch gleichbleibende tribologische Eigenschaften der Sinterunterlagen. Allerdings ist nicht bekannt, wie diese sich über den Lebenszyklus innerhalb der MBJ-Prozesskette verhalten und welcher Einfluss auf die Bauteilgeometrie besteht. Daher werden in diesem Beitrag auf Basis praktischer Versuche Analysen zu den Oberflächeneigenschaften und damit verbundene Auswirkungen auf den Bauteilverzug durchgeführt und Handlungsempfehlungen abgeleitet.

2 Oberflächeneigenschaften

Für eine quantitative Beschreibung realer Oberflächen können verschiedene Kennwerte herangezogen werden. Am häufigsten werden dabei der arithmetische Mittenrauwert R_a , die maximale Rautiefe R_{max} und die gemittelte Rautiefe R_z verwendet. Zur detaillierten Beschreibung sind diese aber nicht ausreichend, wie **Bild 2** verdeutlicht. Werden lediglich diese Parameter herangezogen, können Oberflächen mit teilweise sehr unterschiedlichen tribologischen Eigenschaften nicht unterschieden werden.

So können sich sowohl bei einer gehonten als auch einer gedrehten oder erodierten Oberfläche nahezu gleiche Kennwerte ergeben. Daher sind zusätzlich die reduzierte Spitzenhöhe R_{pk} , die Kernrautiefe R_k und die reduzierte Riefentiefe R_{vk} heranzuziehen. Mit diesen Werten können Oberflächen funktionsgerecht beschrieben und miteinander verglichen werden. Die Werte lassen sich aus der Materialanteilkurve, auch Abbot-Kurve genannt, ableiten [7]. Zur Vermessung von Oberflächen stehen grundsätzlich zwei Methoden (profilbasiert und flächenbasiert) zur Verfügung. Bei der profilbasierten Methode wird zum Beispiel im Tastschnittverfahren ein Linienprofil der Oberfläche aufgezeichnet und anschließend ausgewertet. Die dadurch ermittelten Werte werden mit dem Großbuchstaben R bezeichnet (vgl. Bild 2). Mit dem Großbuchstaben S bezeichnete Werte hingegen werden mittels flächenbasierter Methode ermittelt. Letztere kommen bei den Untersuchungen weiter unten zum Einsatz.

3 Versuchsplanung

Zur Analyse des Einflusses des Zustands der Sinterunterlagen auf ihre Oberflächenbeschaffenheit und das Sinterergebnis werden die Unterlagen in sieben verschiedenen Zuständen untersucht. Dazu zählen:

- porös, unbenutzt;
- porös, gebraucht (1x);
- porös, gebraucht (3x);

- dicht gesintert, gebraucht (3x);
- porös, poliert;
- porös, geschliffen;
- porös, gestrahlt.

Das Polieren erfolgte unter Verwendung einer 1 µm-Schleifsuspension, während für die geschliffenen Unterlagen P240-SiC-Schleifpapier verwendet wurde. Zum Strahlen wurde abrasives Strahlgut mit einer Partikelgröße von 53–90 µm genutzt.

Ergänzend dazu erfolgte die Einflussanalyse verschiedener Zwischenstoffe:

- gedruckter Sintersupport aus 17–4 PH,
- Sinterperlen aus Zirkonoxid (Durchmesser 1 mm),
- Pulver aus Zirkonoxid,
- Emulsion aus Yttriumoxid.

Für die Untersuchungen wurden die Sinterunterlagen zunächst unter Verwendung des Laserscanning-Mikroskops „VK-8710“ der Firma Keyence hinsichtlich ihrer Rauheit nach ISO 25178 [8] vermessen. Für die Datenaufbereitung wurde ein S-Filter von 1,0 µm und ein L-Filter von 0,2 mm verwendet. Anschließend erfolgte die Bestimmung des Haftreibungskoeffizienten unter Verwendung einer schiefen Ebene (**Bild 3**). Hierbei wurde ein Prüfkörper auf einer Unterlage platziert und deren Winkel α langsam erhöht. Erreicht α den Grenzwinkel (Winkel kurz vor dem Losbrechen), liegt ein Kräftegleichgewicht zwischen der Hangabtriebskraft F_{ab} und der Haftreibungskraft F_H vor. Die Hangabtriebskraft selbst resultiert aus der Kräftezerlegung der Gewichtskraft F_G in Hangabtriebskraft und Normalkraft F_N . Wird der Grenzwinkel überschritten, übersteigt die Hangabtriebskraft die Haftreibungskraft und der Prüfkörper fängt an zu gleiten. Unter Verwendung des Prüfkörpergewichts und des ermittelten Winkels α_{grenz} bei dem das Gleiten auftritt, wird der Haftreibungskoeffizient μ durch die nachstehende Formel ermittelt. Als Prüfkörper wurde ein mittels MJB hergestellter Würfel mit einer Kantenlänge von 10 mm verwendet.

$$\mu = \frac{F_{ab}}{F_N} = \tan \alpha_{\text{grenz}} \quad (1)$$

Zur Bestimmung des Einflusses des Reibkoeffizienten auf den Verzug wurden C-förmige Prüfstrukturen mit einem Grünteilaußendurchmesser von 40 mm sowie einer Höhe und Dicke von jeweils 2 mm verwendet, welche auf den jeweiligen Unterlagen gesintert wurden. Dazu wurden diese nach dem Sintern mittels eines elektronischen Messchiebers vermessen. Als Maß für den Verzug wurde der maximale Außendurchmesser nach dem Sintern herangezogen.

Alle Grünteile wurden unter Verwendung des Digital Metal Systems „DMP 2500“ gefertigt. Das verwendete Pulver aus dem Werkstoff 17–4 PH wurde vom selben Hersteller mit den Fraktionsanteilen D10, D50 und D90 von 7,45 µm, 15,77 µm und 26,11 µm bezogen. Das Entpulvern erfolgte mithilfe der manuellen Ausrüstung Depowdering Cabinet, ebenfalls von Digital Metal. Unter Verwendung eines Druckluftstrahls erfolgte, soweit möglich, die Entfernung allen losen Pulvers. Die Bauteile wurden anschließend auf den einzelnen Sinterunterlagen platziert und bei 345 °C für zwei Stunden unter Umgebungsluft entbindert. Abschließend wurden die Bauteile bei einer Maximaltemperatur von 1350 °C in einer Argonatmosphäre mit einem Wasserstoffanteil von 2,9 % gesintert. Dazu wurde der Sinterofen des Desktop Metal Studio Systems verwendet.

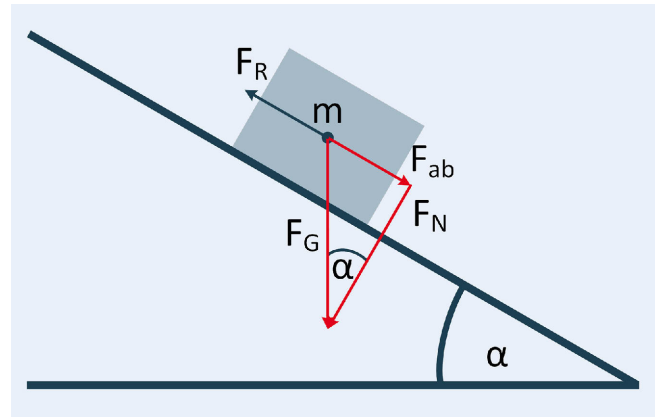


Bild 3. Wirkende Kräfte an einem Körper auf einer schiefen Ebene.
Grafik: Fraunhofer IAPT

4 Ergebnisse

4.1 Oberflächenanalyse

In **Bild 4** sind die Kennwerte Sa und Sz für die verschiedenen Unterlagen aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass sowohl die neuen, die gebrauchten als auch die polierten Platten eine mittlere arithmetische Höhe von $Sa < 1,0 \mu\text{m}$ und damit die im Vergleich geringste Rauheit aufweisen. Die Werte bewegen sich hierbei größtenteils auf gleichem Niveau mit geschliffenen technischen Oberflächen. Auffällig ist zunächst, dass bei den polierten Unterlagen der Sz-Wert geringfügig höher ist als bei den neuen Unterlagen. Ebenfalls ist hier die Standardabweichung größer. Dies weist darauf hin, dass der Poliervorgang zwar die Rauheit im Mittel verringert hat (kleinster Sa-Wert), aber nicht die gesamte Fläche gleich gut poliert wurde. Die Ergebnisse der aufgetrauten und der gestrahlten Platten fallen wie erwartet aus. Hier liegen sowohl der Sa-Wert als auch der Sz-Wert höher als bei den unbehandelten Platten. Die im Vergleich stark erhöhten Sz-Werte für die mehrfach gebrauchten Platten bei geringfügig erhöhter mittlerer arithmetischer Höhe weisen darauf hin, dass vereinzelte Verunreinigungen an der Oberfläche haften.

In **Bild 5** können die Kennwerte Sk, Spk und Svk für die verschiedenen Unterlagen abgelesen werden. Qualitativ stimmt der Verlauf der Kennwerte mit dem Verlauf für Sa und Sz überein und spiegelt auch hier relativ glatte Oberflächen wider. Die neuen, die polierten sowie die einmal gebrauchten Unterlagen unterscheiden sich im Hinblick auf ihre Kennwerte nur geringfügig. Es kann bei allen ein überwiegender Anteil der Kernhöhe Sk festgestellt werden. Außerdem ist besonders die reduzierte Spitzenhöhe Spk sehr gering ausgeprägt, während die reduzierte Senktiefe Svk im Verhältnis als mittelmäßig ausgeprägt anzusehen ist. Es liegen also glatte Oberflächen mit dominierenden Kernhöhen vor, die aufgrund ihrer geringen Spitzenanteile nur wenig zu Verschleiß neigen. Der erhöhte Anteil an Tälern gegenüber Spitzen könnte auf die Porosität des Werkstoffs zurückgeführt werden und erklärt somit auch die deutlich höheren Sz-Werte gegenüber den Sa-Werten. Bestätigt wird dies durch die Betrachtung der dicht gesinterten Unterlagen. Hier überwiegt der Spitzenanteil Spk den Tälerteil Svk.

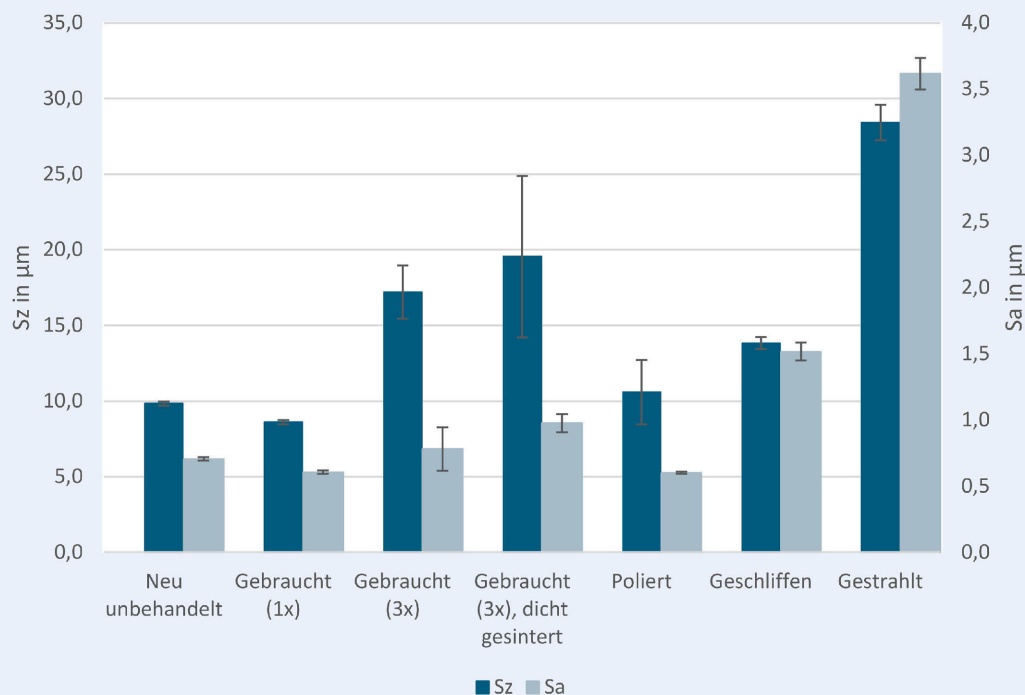


Bild 4. Rauheitskennwerte Sz und Sa der analysierten Sinterunterlagen. Grafik: Fraunhofer IAPT

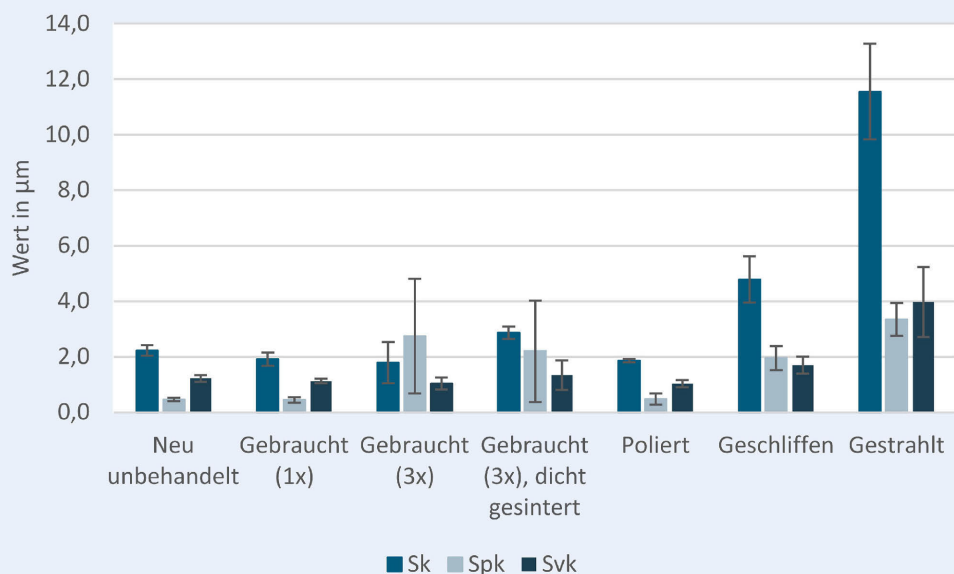


Bild 5. Rauheitskennwerte Sk, Spk und Svk der analysierten Sinterunterlagen. Grafik: Fraunhofer IAPT

4.2 Reibwerte

Die Reibkoeffizienten wurden in Umgebungsatmosphäre bei einer Temperatur von $(20,5 \pm 0,1) ^\circ\text{C}$ und einer Luftfeuchtigkeit von $(30,0 \pm 0,1) \%$ ermittelt. Die Messergebnisse sind in **Bild 6** dargestellt. Unabhängig von der Unterlage ist zu erkennen, dass die Grünteile geringere Haftreibungskoeffizienten aufweisen als die Sinterteile, was auf lose am Grünteil haftende Pulverpartikel zurückzuführen ist. Der geringste Reibwert (0,31) wurde für ein Grünteil auf der polierten Unterlage gemessen. Im Gegenzug dazu weist die dicht gesinterte, gebrauchte Unterlage mit einem Wert von 0,7 den höchsten Haftreibungskoeffizienten für Sinterteile

und die gestrahlte Platte mit einem Wert von 0,56 den höchsten Haftreibungskoeffizienten für Grünteile auf. Im Vergleich mit den Rauheitskennwerten (Sa, Sz, Sk, Spk und Svk) zeigt sich, dass mit steigenden Werten ein Anstieg des Haftreibungskoeffizienten einhergeht (vgl. Bild 4). Das heißt, größere Rauheitskennwerte gehen mit einem größeren Haftreibungskoeffizienten einher.

4.3 Verzugsanalyse

In der Analyse des Bauteilverzugs wurden ergänzend zu den unterschiedlich behandelten Sinterunterlagen die Einflüsse der eingangs genannten Zwischenstoffe analysiert. Dazu wurden die

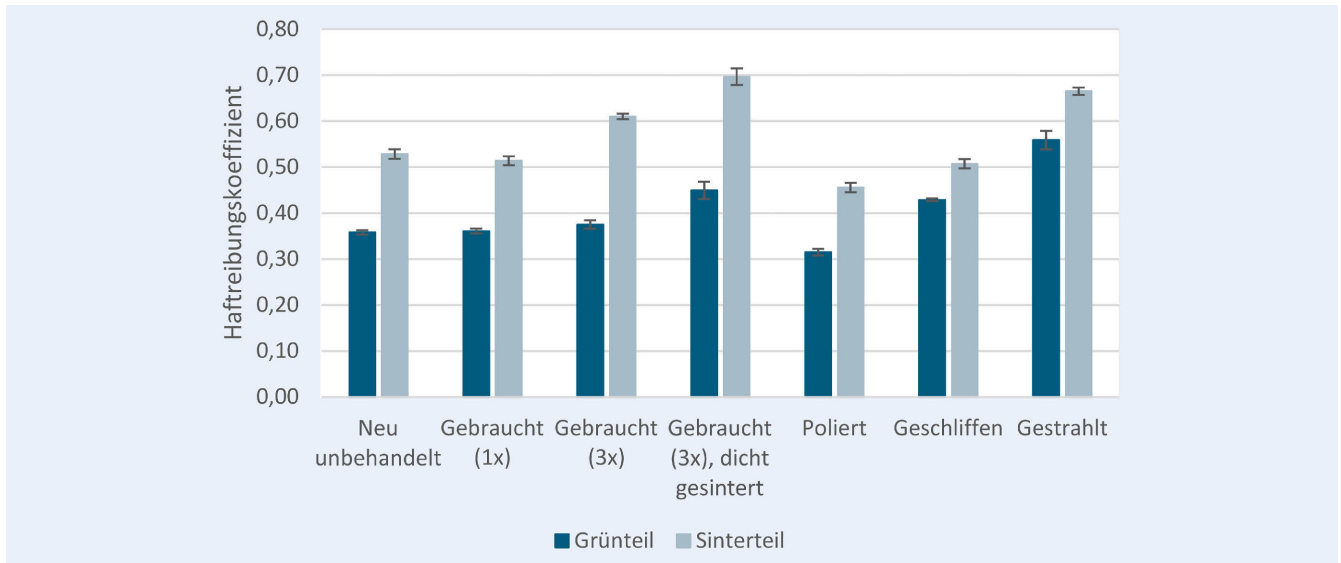


Bild 6. Haftreibungskoeffizienten der analysierten Sinterunterlagen. Grafik: Fraunhofer IPT

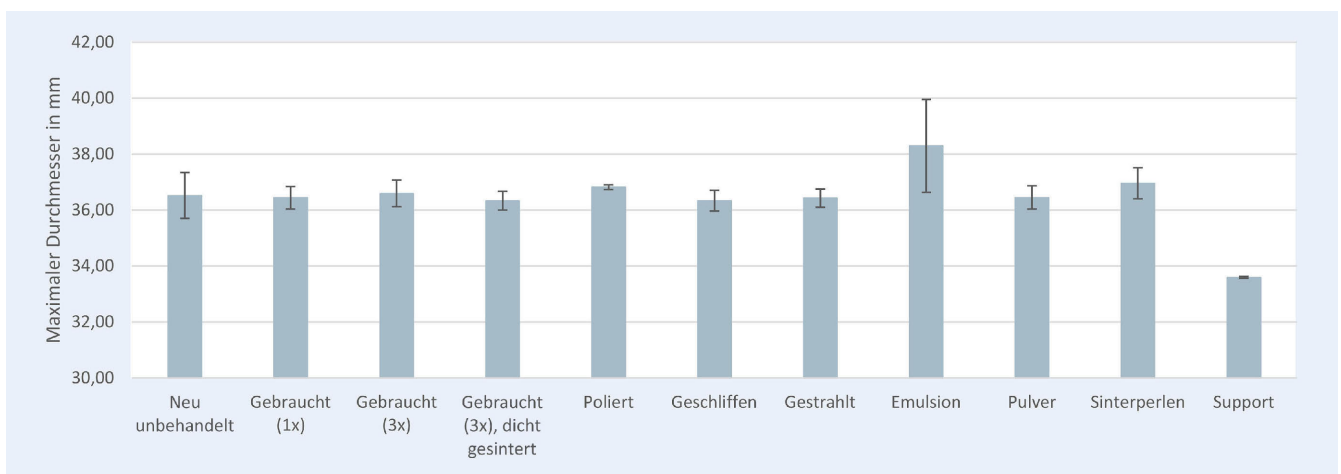


Bild 7. Maximale Durchmesser der Prüfkörper in Abhängigkeit der verwendeten Sinterunterlage. Grafik: Fraunhofer IPT

Zwischenstoffe auf der Sinterunterlage derart appliziert, dass kein Kontakt zwischen Bauteil und Sinterunterlage auftrat. Aus praktischen Gründen wurden die Sinterperlen in einer keramischen Schale platziert. Um eine Rollbewegung der Kugeln zu ermöglichen, wurde ein Füllgrad der Schale von circa 90 % umgesetzt. Bei dem Sintersupport handelt es sich um eine zylindrische Scheibe, welche den gleichen Außendurchmesser wie der Prüfkörper aufweist. Um ein Trennen des Bauteils von dem Sintersupport nach dem Sintern zu ermöglichen, wurde dieser ebenfalls mit einer Schicht Zirkonoxidpulver versehen.

Betrachtet man die in **Bild 7** dargestellten maximalen Durchmesser der Prüfkörper nach dem Sintern, so ist zu erkennen, dass, abgesehen vom Sintersupport, alle untersuchten Varianten eine signifikante Verformung aufweisen. Dadurch dass der Support im selben Prozess wie der Prüfkörper hergestellt wurde, schrumpft dieser in gleichem Maße und ermöglicht so ein ungehindertes Schrumpfen des Prüfkörpers. Mit Ausnahme der auf der Emulsion und dem Support gesinterten Prüfkörper weisen alle anderen einen ähnlichen maximalen Durchmesser von durchschnittlich 36,54 mm auf. Sowohl Polieren, Schleifen als

auch Strahlen haben keinen signifikant positiven oder negativen Einfluss auf die Bauteilverformung. Weiterhin kann festgehalten werden, dass eine Nutzung der Sinterunterlagen über mehrere Sinterzyklen ebenfalls keine negativen Auswirkungen auf den Verzug im Vergleich zu einer unbenutzten Sinterunterlage aufweist. Bei Verwendung der Emulsion lag mit durchschnittlich 38,29 mm der größte Durchmesser und bei Verwendung des Sintersupports mit durchschnittlich 33,59 mm der geringste Durchmesser vor. Die Verwendung von Keramikpulver ließ ebenfalls keinen Einfluss erkennen. Während Sinterperlen sich durchaus als geeignet für Anwendungen im Dentalbereich erweisen [9], trifft dies nicht auf den untersuchten Werkstoff zu. Zwar liegt ein ähnlicher Verzug wie bei den anderen Unterlagen vor, alle darauf gesinterten Bauteile weisen jedoch Eindrücke auf der Kontaktfläche auf.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Während des Sintervorgangs führt unter anderem die durch die Bauteilschrumpfung induzierte Reibkraft zu einem uner-

wünschten Verzug der Bauteile. Als einer der Bestandteile eines tribologischen Systems haben die Sinterunterlagen einen signifikanten Einfluss auf die Reibkoeffizienten und somit auch auf den Bauteilverzug. Zwar konnte gezeigt werden, dass die Rauheit der Sinterunterlagen einen direkten Einfluss auf den Haftreibungskoeffizienten hat, welcher sich allerdings nicht im Bauteilverzug widerspiegelt. Mit steigenden Rauheitskennwerten geht erwartungsgemäß auch eine Erhöhung des Haftreibungskoeffizienten einher, was sich im qualitativen Vergleich der Rauheitskennwerte mit den Haftreibungskoeffizienten zeigt. Vergleicht man allerdings die Werte der Haftreibungskoeffizienten oder der Oberflächenrauheit mit den Verzügen der Prüfkörper, lässt sich kein Zusammenhang feststellen. Trotz zum Teil signifikanten Unterschieden zwischen den Haftreibungskoeffizienten von bis zu 0,24 liegt der Unterschied im Verzug der Prüfkörper beziehungsweise dem maximalen Durchmesser lediglich im Bereich der Standardabweichung. Im Umkehrschluss zeigt sich dadurch, dass innerhalb der MBJ-Prozesskette die Sinterunterlagen mehrfach verwendet werden können, ohne dass sich dies nachteilig auf den Bauteilverzug auswirkt. Denn trotz der stark unterschiedlichen Reibwerte weichen die Geometrien der gesinterten Bauteile nur geringfügig voneinander ab. Ausgenommen hiervon sind allerdings die auf Sintersupports (positiver Einfluss) und Emulsion (negativer Einfluss) gesinterten Bauteile. Die geringen Unterschiede können unter anderem darauf zurückzuführen sein, dass die Probengeometrie nicht für derartige Untersuchungen geeignet ist, da sich diese nicht ausreichend bei Änderungen des Reibkoeffizienten verzieht und die gemessenen Verzüge somit lediglich im Bereich der Standardabweichung liegen. Ebenso ist es möglich, dass in diesem System die Umgebungstemperatur einen dominierenden Einfluss auf die tribologischen Eigenschaften hat. So kann der Reibkoeffizient mit steigender Temperatur, je nach Materialpaarung, sowohl ansteigen als auch abfallen [10]. Dies kann dazu führen, dass sich die bei Raumtemperatur vorherrschenden Unterschiede im Reibkoeffizienten reduzieren. Daher sind zusätzliche tribologische Analysen bei Sintertemperatur notwendig, um die Einflüsse der Reibung auf den Bauteilverzug ausreichend bestimmen zu können.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken der Hamburgische Investitions- und Förderbank (IFB Hamburg) für die finanzielle Unterstützung im Projekt „PuMa – Entwicklung einer prototypischen Softwarelösung zur Vorhersage und Kompensation des Bauteilverzugs beim Sintern von Metall-Binder-Jetting (MBJ)-Bauteilen sowie einer effizienten Nachbearbeitungs- und Qualifizierungsstrategie“.

Literatur

- [1] Oropeza, D.; Hart, A. J.: A laboratory-scale binder jet additive manufacturing testbed for process exploration and material development. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 114 3459–73, 2021
- [2] Mostafaei, A.; Elliott, A. M.; Barnes, J. E.; Li, F.; Tan, W.; Cramer, C. L.; Nandwana, P.; Chmielus, M.: Binder jet 3D printing—Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges. *Progress in Materials Science* 119 100707, 2021
- [3] Sadeghi Borujeni, S.; Shad, A.; Abburi Venkata, K.; Günther, N.; Ploshikhin, V.: Numerical simulation of shrinkage and deformation during sintering in metal binder jetting with experimental validation. *Materials & Design* 216 110490, 2022
- [4] Mostafaei, A.; Rodriguez De Vecchis, P.; Nettleship, I.; Chmielus, M.: Effect of powder size distribution on densification and microstructural evolution of binder-jet 3D-printed alloy 625. *Materials & Design* 162 375–83, 2019
- [5] Oh, J.-W.; Nahm, S.; Kim, B.; Choi, H.: Anisotropy in green body bending strength due to additive direction in the binder-jetting additive manufacturing process. *Korean Journal of Metals and Materials* 57 227–35, 2019
- [6] Volk, R.: Rauheitsmessung: Theorie und Praxis (Beuth Praxis) 3. Aufl. Beuth Verlag, 2018
- [7] Baue, F.: Tribologie: Prägnant und praxisrelevant. Springer Vieweg, 2021
- [8] DIN EN ISO 25178-1:2016-12: Geometrische Produktspezifikation (GPS)—Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft-Teil 1: Angabe von Oberflächenbeschaffenheit (ISO 25178-1:2016); Deutsche Fassung EN ISO 25178-1:2016. Beuth Verlag
- [9] Denry, I.; Kelly, J. R.: State of the art of zirconia for dental applications. *Dental Materials* 24 299–307, 2008
- [10] Broeckmann, C.; Weißgärber, T.; Deng, Y.; Studnitzky, T.: Schlussbericht Minimierung des Verzugs beim Sintern durch Beeinflussung der Sinterunterlage. IGF Vorhaben Nr.: 19802 BG, 2020



Heiko Blunk, M.Sc. 
heiko.blunk@iapt.fraunhofer.de

Björn-Felix Dettmar, B.Sc.

Fraunhofer-Einrichtung
für Additive Produktionstechnologien IAPT
Am Schleusengraben 14, 21029 Hamburg
www.iapt.fraunhofer.de

Prof. Dr.-Ing. Arthur Seibel 
arthur.seibel@leuphana.de

Institut für Produktionstechnik und -systeme
Leuphana Universität Lüneburg
Universitätsallee 1, 21335 Lüneburg
www.leuphana.de

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)