

Oberflächenbearbeitung von additiv gefertigten metallischen Bauteilen

Gleitschleifen additiv gefertigter Bauteile

S. Stribick, E. Dieringer, S. Shenberg-Stotz

ZUSAMMENFASSUNG Die additive Fertigung liefert Sonderbauteile in großer Form- und Variantenvielfalt. Die druckrauen Oberflächen müssen jedoch – häufig manuell – nachbearbeitet werden, um höchste mechanische Eigenschaften zu erreichen. Im Rahmen dieses Beitrags wird überprüft, inwieweit sich das automatisierbare Gleitschleifen für die Nachbearbeitung von additiv gefertigten Bauteilen eignet und welche Herausforderungen dabei zukünftig zu lösen sind.

STICHWÖRTER

Additive Fertigung, Schleifen, Feinbearbeitung

Barrel finishing of additive manufactured components – Surface finishing of additive manufactured metallic components

ABSTRACT The additive manufacturing process provides unique components in various forms and variants. However, it is mostly necessary for the „as build“ surface to be finished with the help of manual processes and accomplish the highest material properties. This article will check to what extent the automatable barrel finishing is suitable for the surface finishing of additive-manufactured components and which challenges there will be in the future.

1 Einleitung und Motivation

Die additive Fertigungstechnologie hat in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen. Begründet ist dies durch den technologischen Fortschritt, wodurch höhere Fertigungsgeschwindigkeiten, eine hohe Automatisierbarkeit des Herstellungsprozesses sowie eine enorme Flexibilität in der Formgebung oder einer individuellen Anpassung eines zu druckenden Bauteils ermöglicht werden [1]. Allerdings stellt die Nachbearbeitung der gedruckten Bauteile noch eine große Herausforderung dar. Qualitativ hochwertige Oberflächen sind notwendig, um den entsprechenden Anforderungen an Bauteile gerecht zu werden. Daher müssen gedruckte Bauteile oftmals noch nachbearbeitet werden. Aufgrund der hohen Formvielfalt und Komplexität der Bauteile, findet dies oftmals manuell statt. [2] Das Ziel dieses Beitrages, ist zu überprüfen, inwieweit das Gleitschleifen als automatisiertes Verfahren geeignet ist, um metallisch gedruckte Bauteile mit verschiedenen Schleifkörpern sowohl auf Innen- als auch Außenflächen zu bearbeiten und welche Herausforderungen sich hierzu ergeben.

2 Stand der Technik und Forschung

2.1 Additive Fertigung von Metallen

Im Gegensatz zur traditionellen, subtraktiven oder umformen- den Fertigung werden bei der additiven Fertigung die Bauteile mit Materialzuführung statt -reduzierung oder -verformung hergestellt. Es handelt sich um das sukzessive sowie schichtweise Auftragsprinzip von formlosen Material in Pulverform, wodurch entsprechend eines digitalen 3D-Modells ein physikalisches Bauteil entsteht. Bei metallischen Werkstoffen wird das pulverförmige Material in der Regel schichtweise aufgetragen und durch

eine Energiequelle lokal gesintert oder geschmolzen. Dadurch wird eine Bindung zwischen den einzelnen Schichten erreicht. Dieser Prozess erfolgt iterativ, bis das Bauteil vollständig entsprechend des 3D-Modells mittels dem jeweiligen Druckverfahren nachgebaut wurde. [1]

Durch das verfahrensbedingte Funktionsprinzip entstehen die für den 3D-Druck charakteristischen Oberflächen mit dem „Treppenstufeneffekt“. Der Effekt bezieht sich auf die rillenförmige Ausprägung an den Übergängen zwischen den unterschiedlichen Druckschichten auf der Oberfläche des gedruckten Bauteils. Dieser Treppenstufeneffekt kann mithilfe unterschiedlicher Druckeinstellungen reduziert, jedoch nicht ganzheitlich eliminiert werden. [1]

Gegenüber der traditionellen Herstellungsprozesse ergeben sich weitere Besonderheiten für die additive Fertigung. In Abhängigkeit der Bauteildimensionen sind meistens Stützstrukturen für den Aufbau erforderlich. Die Stützstrukturen, als zusätzliches, unterstützendes Material am gedruckten Bauteil, verhindern Verformungen, Absenkungen sowie einen Verzug der Druckobjekte aufgrund der physikalischen Gewichtskraft während ihres Aufbaus. Nach dem Druckprozess müssen diese maschinell oder manuell entfernt werden. [3]

Unerwünschte Oberflächenfehler, die sowohl durch Treppenstufeneffekte als auch an Anbindungsstellen von Stützstrukturen entstehen können, beeinflussen die Oberflächenqualität negativ. Diese Fehlstellen entsprechen nicht den Anforderungen an hochbelastete oder optisch ansprechende beziehungsweise hochgenaue Bauteile und müssen somit zusätzlich nachbearbeitet werden. Klassische Nachbearbeitungsverfahren wie Fräsen oder Sandstrahlen besitzen einige prozessspezifische Nachteile, wie die zu geringe Berücksichtigung der Bauteilkomplexität von additiv



Bild 1. Verwendeter Trogvibrator Mitro Typ A für die Versuchsreihen.
Grafik: Fraunhofer IPA

gefertigten Bauteilen oder die geringe Reproduzierbarkeit. [4] Ein alternatives Verfahren für die Nachbearbeitung stellt das Gleitschleifen dar.

2.2 Gleitschleifen

Das Gleitschleifen ist ein Verfahren zur Veredelung von Oberflächen unterschiedlicher Werkstoffe [5]. Während des Gleitschleifprozesses werden die nachzubearbeitenden Bauteile zusammen mit den Schleifkörpern und Compounds in einem Arbeitsbehälter platziert. Dabei können die Bauteile entweder in einer speziellen Vorrichtung eingespannt oder lose gelegt werden. Der Materialabtrag erfolgt durch Reibung zwischen den Schleifkörpern und den Bauteilen, die durch eine rotierende oder vibrierende Bewegung des Schleifbehälters hervorgerufen wird. Es existieren unterschiedliche Anlagenprinzipien. Diese Prinzipien lassen sich unterteilen in Trommel-, Vibrations- sowie Tauchverfahren [5].

2.3 Gleitschleifen von additiv gefertigten Bauteilen

Das Gleitschleifen wird aktuell auf Grund der hohen Flexibilität und der Möglichkeit Innenflächen reproduzierbar zu bearbeiten auch für additiv gefertigte Bauteile umfänglicher untersucht [6].

Nalli *et al.* zeigten in den durchgeführten Untersuchungen, dass mittels Gleitschleifen die durch den Herstellungsprozess entstandenen Oberflächenrauheiten (teilweise $R_a > 10 \mu\text{m}$) unabhängig von der Druckrichtung deutlich auf $R_a < 1 \mu\text{m}$ reduziert werden können. Gleichzeitig konnten keine Treppenstufeneffekte mehr beobachtet werden, sodass die Festigkeiten und Bruchdehnungen gegenüber den druckrauen Vergleichsproben deutlich erhöht werden konnten. [4]

Khorasani *et al.* haben untersucht, inwieweit verschiedene Prozessparameter sich auf die Bearbeitungsqualität von Innen- und Außenflächen auswirken. Es hat sich hier gezeigt, dass das Gleitschleifen auf Innenflächen im Vergleich zu Außenflächen nur einen geringen Einfluss hat. Ein relevanter Parameter auf die Oberflächenqualität stellt die Schleifgeschwindigkeit dar. [6]

Darüber hinaus werden auch innovative Ansätze erforscht, um den Gleitschleifprozess für additive Bauteile weiter zu verbessern. Dazu gehören beispielsweise der Einsatz von ultraschallunterstützter Gleitschleiftechnik, bei der Ultraschallvibrationen in die Trommel eingeleitet werden, um die Bearbeitungseffizienz und Oberflächenqualität zu steigern [4, 6]

Bagehorn *et al.* haben zusätzlich noch die Eignung von Gleitschleifen mit anderen Oberflächennachbearbeitungsverfahren für die Wechselbelastung verglichen. Es zeigt sich hierbei, dass eine Nachbearbeitung durch Fräsen die besten Ergebnisse hinsichtlich Oberflächenrauheit und Dauerschwingfestigkeit erzielt hat, jedoch oftmals für komplexe Geometrien der additiven Fertigung nicht geeignet ist. Das Gleitschleifen hat die Rauheit der Oberfläche deutlich reduzieren, jedoch einige Vertiefungen nicht bearbeiten können. Mit einer höheren Prozesszeit konnten diese Vertiefungen jedoch verringert werden. [2]

3 Versuchsvorgehen und -aufbau

Der Fokus im Rahmen dieser Veröffentlichung liegt auf der Nachbearbeitung der Oberflächen, um den Treppenstufeneffekt zu verringern und die Einflussfaktoren auf die resultierende Oberflächenrauheit zu bestimmen. Dafür wird ein Trogvibrator Mitro Typ A der Firma IPS Innovative Produktionssysteme verwendet (siehe **Bild 1**). Es werden mehrere Versuchsreihen durchgeführt, um die Eignung des Verfahrens für Oberflächennachbearbeitungen zu testen und zu bewerten. Dabei werden unterschiedliche metallische Werkstoffe und Schleifkörper eingesetzt und der Einfluss durch Bauteilorientierung näher betrachtet. Ebenso wird untersucht, inwieweit eine Innenflächenbearbeitung möglich ist. Bearbeitet wurden im Rahmen der Untersuchungen zwei Bauteilgeometrien unterschiedlicher Werkstoffe. Beim Edelstahl-Bauteil (1.4404) handelt es sich um einen Trichter zur Dosierung von Stückgut mit abgerundetem Rechteckquerschnitt – $85 \times 30 \text{ mm}$ auf $35 \times 10 \text{ mm}$ – und einer Tiefe von 120 mm . Zudem wurde ein prismenförmiger Halter mit Befestigungslöchern und einer Kantenlänge von circa 45 mm aus einem Aluminium- (AlSi10Mg) wie auch einem Titanwerkstoff (TiAl6V4) geschliffen. Alle Bauteile wurden mittels SLM (selektiven Laserschmelzen) hergestellt.

Alle Versuche werden nass unter der Zugabe von Wasser entsprechend der Herstellerangaben durchgeführt. Eine Übersicht über die Versuche liefert die **Tabelle 1**. Für die Bestimmung der Oberflächenrauheit wird ein „Alicona Infinte Focus SL“ mit 10-fach Objektiv verwendet. Die Bauteile werden in regelmäßigen Abständen jeweils nach einer Stunde Bearbeitungszeit vermessen. An jedem Bauteil werden dafür vier Messungen durchgeführt. Zwei Messungen in horizontaler Ausrichtung, zwei in vertikaler Ausrichtung. Aus diesen Werten werden die Mittelwerte gebildet.

Die verwendeten Schleifkörper sind exemplarisch in **Tabelle 2** dargestellt und deren Form und das Gewicht eines einzelnen Körpers zusammengefasst. Das Gewicht eines verwendeten Edelmetall-Korns ist hierbei nicht messbar gewesen.

Tabelle 1. Übersicht der durchgeführten Versuche mit verwendeten Schleifkörpern und Werkstoffen.

	Versuch 1: Vergleich Schleifkörper	Versuch 2: Werkstückwerkstoffe	Versuch 3: Bauteilorientierung	Versuch 4: Innenflächenbearbeitung
Versuchsziel	Vergleich unterschiedlicher Schleifkörper	Rauheitsentwicklung abhängig vom Werkstückwerkstoff	Einfluss der Bauteilorientierung im Vergleich zur Fließrichtung des Granulates	Einfluss Schleifkörper auf Bearbeitung Innenflächen
Schleifkörper	<ul style="list-style-type: none"> – WXC 6X6 TRI – WXC 3x6 CYL – Edelkorund: F24 – Kombierter Prozess (Benchmark): <ul style="list-style-type: none"> o RD K12 o V2030 NC 8K o Supercut ZS 6X10 	– RD K12	Kombierter Prozess: <ul style="list-style-type: none"> o RD K12 (3h) o V2030 NC 8K (3h) o Supercut ZS 6X10 (4h) 	<ul style="list-style-type: none"> – WXC 6X6 TRI – WXC 3x6 CYL – Edelkorund: F24
Werkstückwerkstoff	1.4404	<ul style="list-style-type: none"> – AlSi10Mg – TiAl6V4 	1.4404	1.4404
Bauteilform	Trichter	Prisma	Trichter	Trichter

Tabelle 2. Verwendete Schleifkörper, deren Form und Gewicht.

	WXC 6X6 TRI	WXC 3X6 CYL	Edelkorund F24	RD K12	V2030 NC 8K	Supercut ZS 6x10
Bild						
Form	Prisma	Zylinder	Korn	Kegel	Kegel	Zylinder
Gewicht / g	0,479	0,174	-	1,492	0,369	0,185

Für den Vergleich der Schleifkörper werden baugleiche Werkstücke aus dem Werkstoff 1.4404 in Trichterform jeweils mehrere Stunden geschliffen. Dabei werden die Schleifkörper RD K12, V2030 NC 8K und Supercut ZS 6X10 in einem Prozess für je drei Stunden nacheinander verwendet. Dies ist aktuell ein industrietreiblicher Benchmarkprozess für große Aluminium- und Stahlbauteile. Die anderen gewählten Schleifkörper werden jeweils ohne Kombination für zwölf Stunden am Stück verwendet.

Für die Untersuchung der Auswirkung des Gleitschleifens auf verschiedene Werkstückwerkstoffe werden kegelförmige Schleifkörper RD K12 gewählt. Es wird für die Versuche darauf geachtet, dass die Rauheit der Bauteile zu Beginn der Versuche möglichst vergleichbar ist. Die Titan- und Aluminiumbauteile werden dabei insgesamt für sechs Stunden geschliffen.

Ebenfalls liegt im Trogvibrator eine feste Fließrichtung des Granulates vor. Bei fest eingespannten Bauteilen herrschen also konstante Verhältnisse zwischen Bauteilorientierung und Fließrichtung. Es soll überprüft werden, inwieweit die Bauteilorientierung im Vergleich zur Fließrichtung des Granulats das Schleifergebnis beeinflusst.

Zum Abschluss wird mit unterschiedlichen Schleifkörpern überprüft, inwieweit die Bearbeitung von Innenflächen bei fest eingespannten Trichterbauteilen mit abnehmenden Innenabmes-

sungen möglich ist. Verwendet werden hierfür Schleifkörper, die kleiner sind als der kleinste Innendurchmesser des Trichters. Dadurch soll eine Fließbewegung möglich sein. Die Schleifdauer beträgt dabei zwölf Stunden und die Bauteile werden nach Abschluss der Versuchsreihe aufgetrennt und auf der Innenseite vermessen.

4 Versuchsergebnisse und Diskussion

Nachfolgend wird auf die Ergebnisse der einzelnen Versuchsreihen näher eingegangen und diese interpretiert.

Versuch 1: Untersuchung verschiedener Schleifkörper

Die resultierenden Rauheitswerte, die durch den Einsatz verschiedener Schleifmittel auf gedruckten Bauteilen aus 1.4404 entstanden sind, werden im Bild 2 graphisch dargestellt. Dabei wird ersichtlich, dass die erzielten Oberflächenrauheitswerte je nach eingesetztem Schleifmittel erheblich beeinflusst werden.

Die niedrigsten Rauheiten konnten durch die Kombination unterschiedlicher Schleifkörper, dem industriellen Benchmarkprozess, erreicht werden. Nach neun Stunden konnten keine weiteren Fortschritte festgestellt werden, weshalb der Versuch

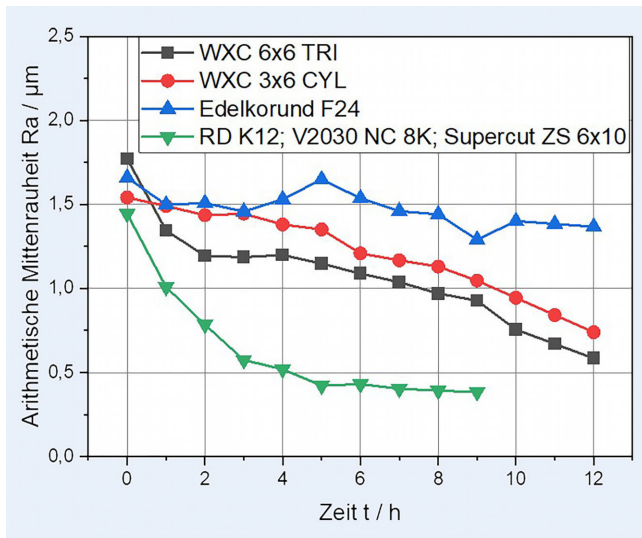


Bild 2. Entwicklung der arithmetischen Mittenrauheit Ra bei Verwendung unterschiedlicher Schleifkörper. Grafik: Fraunhofer IPA

unter Kombination der Schleifkörper vorzeitig beendet wurde. Für die metallischen gedruckten Bauteile hat der Benchmarkprozess, wie bei den konventionell zerspannten Bauteilen, am besten funktioniert. Beim Gleitschleifen gilt: Die Form und Bindung der Schleifkörper beeinflusst stark die resultierende Zerspanleistung [5]. Durch die zu Beginn stark kantige Form des Kegels mit Spitze und das gleichzeitig höchste Gewicht (RD K12) entsteht eine hohe Zerspanleistung. Diese wird mit dem zweiten Kegel (dritthöchstes Gewicht, V2030 NC K8) fortgesetzt. Daher liegt hier eine schnelle Abnahme der Rauheit vor. Das Veredeln der Oberfläche erfolgt schlussendlich mit dem leichten Zylinder Supercut ZS 6x10 unter einem Abflachen der Rauheitsabnahme.

Eine besondere Auffälligkeit ist das Verhalten des Zylinder WXC 3x6 CYL. Er liefert trotz der deutlich geringeren Masse (0,174 g) ähnliche Rauheitskennwerte wie die Prismen WXC 6x6 TRI (0,479 g). Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass die Masse zwar geringer ist, bei gleicher Füllhöhe der Gleitschleif-

anlage aber deutlich mehr Kanten durch die höhere Anzahl an Schleifkörpern vorhanden sind, die Abtrag erzeugen können. Dadurch wird ein nahezu vergleichbares Schleifergebnis erreicht. Nach zwölf Stunden Bearbeitungszeit erreichen die Zylinder und Prismen ein etwas schlechteres Ergebnis im Vergleich zum Benchmark-Prozess (9 Stunden). Ursächlich hierfür wird vor allem das deutlich höhere Gewicht des ersten Schleifkörpers des Benchmark-Prozesses gesehen.

Dem gegenüberstellend lieferte die Verwendung von Korund-sand lediglich minimale Verbesserungen der Oberflächenrauheit, auch nach zwölf Stunden Bearbeitungszeit. Hier wird der Grund ebenfalls in der Masse der Schleifkörper gesehen. Hauptverantwortlich ist das geringe Gewicht eines Kornes. Somit ist die Zerspanleistung sehr gering und es können nur minimale Verbesserungen der Oberflächenrauheit erreicht werden. [5]

Es ist jedoch allgemein erkennbar, dass wie von Radziejewska et al. [7] beschrieben, die Schleifkörperauswahl einen starken Einfluss auf die entstehende Rauheit hat und damit einen entscheidenden Faktor für die Oberflächennachbearbeitung darstellt. Somit beeinflusst die Schleifkörperauswahl sowohl die Ergebnisqualität, als auch die Prozesszeit.

Versuch 2: Variation der Werkstückwerkstoffe

Das Ziel dieser Versuchsreihe ist es, den Einfluss des Werkstückwerkstoffes auf den Schleifprozess, im Besonderen die Bearbeitungszeit und die -qualität, näher zu bestimmen. Dafür werden Bauteile aus AlSi10Mg und TiAl6V4 mit identischer arithmetischen Mittenrauheit Ra mit demselben Granulat geschliffen. Um die Aussagekraft der Untersuchung zu verbessern, wird zusätzlich noch die mittlere arithmetische Höhe Sa verglichen.

Anhand von Bild 3 wird ersichtlich, dass eine Verringerung der Oberflächenrauheit bei AlSi10Mg im Vergleich zu TiAl6V4 deutlich schneller erreicht werden kann. Ursächlich hierfür ist, dass TiAl6V4 durch die höhere Dehngrenze $R_{p0,2}$ von 1110 MPa mit einer Bruchdehnung von 9 % im Vergleich zu der Dehngrenze $R_{p0,2}$ mit 230 MPa und einer Bruchdehnung von 6,3 % für AlSi10Mg (Kennwerte für druckraue Oberflächen aus Datenblätter) für eine Zerspanung deutlich höhere Anforderungen auf-

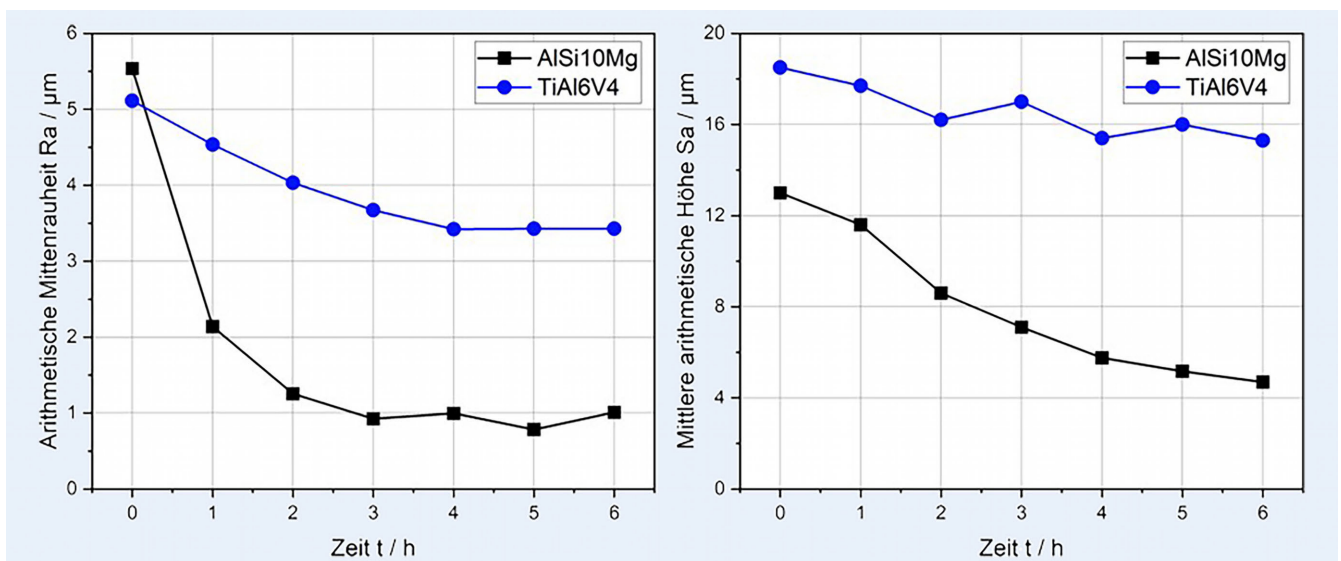


Bild 3. Entwicklung der arithmetischen Mittenrauheit Ra und mittleren arithmetischen Höhe Sa bei unterschiedlichen Werkstoffen. Grafik: Fraunhofer IPA

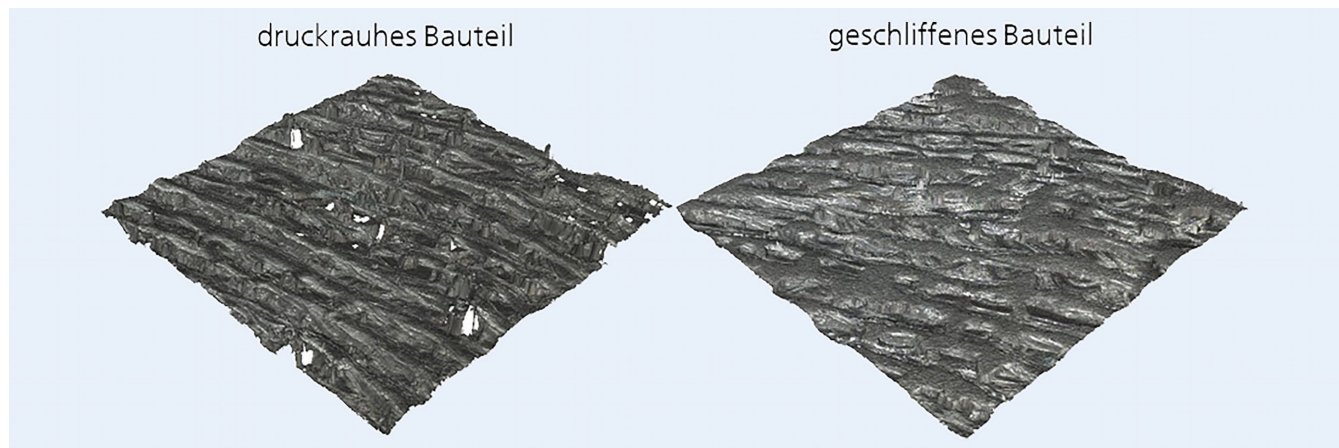


Bild 4. Vergleich von Ti6AlV4 mit druckrauen Oberflächen und nach sechs Stunden Schleifzeit. Grafik: Fraunhofer IPA

weist. [5, 8, 9] Da es sich beim Gleitschleifen um einen Zerspanprozess mit geometrisch unbestimmter Schneide handelt, ist davon auszugehen, dass die deutlich höheren Werkstoffparameter hier der Hauptgrund für die verlängerte Bearbeitungszeit sind.

Der Verlauf der dargestellten Kurven ist unabhängig vom Messwert jedoch vergleichbar. Für beide Messwerte verbessert sich die Rauheit der Aluminiumlegierung schneller als die der Titanlegierung. Hier ergeben sich für die mittleren arithmetischen Höhe Sa leichte Schwankungen. Außerdem sind die Ausgangskennwerte für die Oberflächen hier nicht gänzlich vergleichbar. Dies liegt daran, dass der Bestimmung von der arithmetischen Mittenrauheit Ra und der mittleren arithmetischen Höhe Sa unterschiedliche Messprinzipien zu Grunde liegen.

Die abflachenden Kurven bei der arithmetischen Mittenrauheit Ra legen auch nahe, dass hier die Prozessgrenzen für die jeweiligen Werkstoffe mit dem in dieser Untersuchung verwendeten Granulat erreicht wurden. Auffällig ist, dass die Rauheitskennwerte für Titan auch wieder über denen für Aluminium liegen. Dies ist ebenfalls auf die schwerere Bearbeitbarkeit des Werkstoffes zurückzuführen. Es ist davon auszugehen, dass hier mit anderen Granulaten, beispielsweise mit höherem Gewicht und gleichzeitig scharfen Kanten, noch bessere Ergebnisse erzielt werden können. Hierfür sind weitere Untersuchungen notwendig.

In **Bild 4** sind exemplarisch die mittels Alicona-Messgerät dokumentierten Oberflächen der Titanlegierung dargestellt. Links ist das druckraue Bauteil zu sehen, rechts das Bauteil nach sechs Stunden Bearbeitung. Dabei ist zu erkennen, dass das druckraue Bauteil starke Treppenstufen aufweist. Diese sind zwar nach der Bearbeitung noch immer zu erkennen, jedoch deutlich reduziert. Somit kann Gleitschleifen den Treppenstufeneffekt merklich reduzieren.

Versuch 3: Einfluss der Bauteilorientierung beim Einspannen der Proben

Das Ziel der Untersuchung ist es, den Einfluss der Orientierung im Schleifkörperfluss bei fest eingespannten Bauteilen zu beurteilen. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Oberflächenqualität hierbei abhängig von der Bauteilorientierung ist. Die erzielten Ergebnisse werden im **Bild 5** zur Veranschaulichung dargestellt. Die Oberflächenunterschiede lassen sich auf die Ausrichtung der Bauteile im verwendeten Trogvibrator zurückführen. Durch die Fließbewegung der Schleifkörper ergibt sich eine der

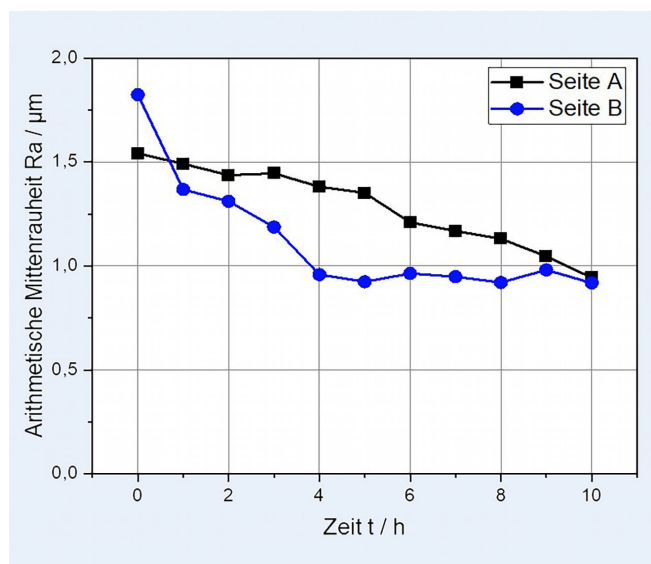


Bild 5. Entwicklung der arithmetischen Mittenrauheit Ra abhängig von der Bauteilorientierung. Grafik: Fraunhofer IPA

Fließrichtung zugeneigte und eine abgeneigte Seite (Windschatten).

Dieser Effekt ist schematisch dargestellt in **Bild 6**. Dadurch werden die Seiten zuerst unterschiedlich stark bearbeitet. Mit der Zeit nähern sich die Rauheitskennwerte jedoch immer weiter an, sodass davon auszugehen ist, dass der Einfluss der Bauteilorientierung mit zunehmender Bearbeitungszeit abflacht.

Als eine mögliche Verbesserung kann der Einsatz eines alternativen Maschinenkonzeptes mit angepasster Schleifkörperbewegung oder der kontinuierliche Wechsel der Bauteilausrichtung zur Verringerung der Nachbearbeitungsdauer empfohlen werden.

Versuch 4: Bearbeitung von Innenflächen mittels Gleitschleifen

Zum Abschluss der Untersuchungen folgt die Bewertung der Bearbeitung von Innenflächen mittels Gleitschleifen am Beispiel des verwendeten Trichterbauteils. Die Ergebnisse der aufgetrennten Proben nach Abschluss der zwölf Stunden Bearbeitung sind in **Bild 7** dargestellt. Die Untersuchung zeigt, dass die Oberflächenqualität der kleinsten Innenabmessung 13 x 10 mm² für alle

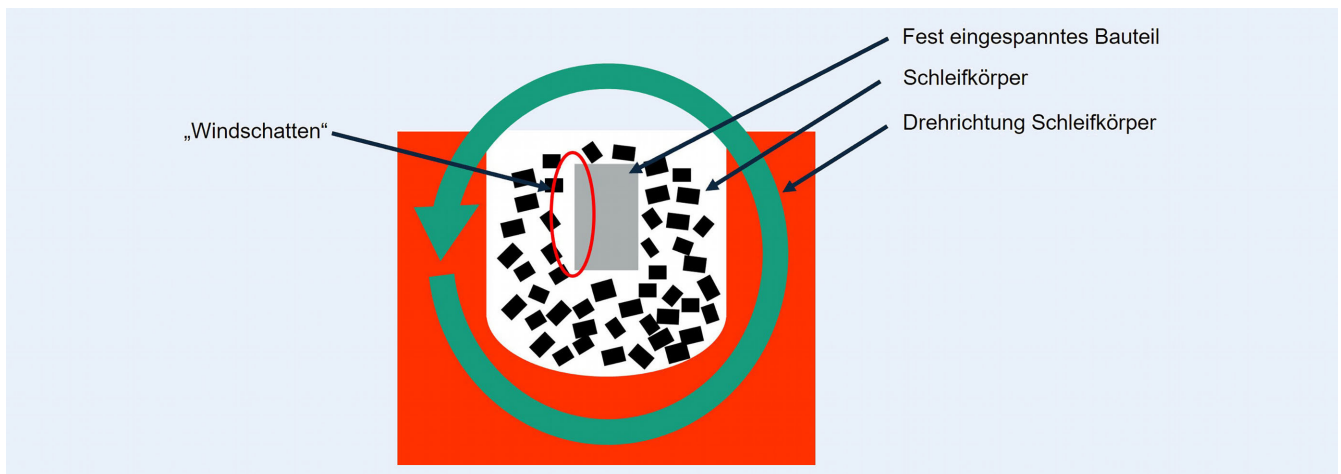


Bild 6. „Windschatteneffekt“ beim Gleitschleifen fest eingespannter Bauteile im Trogvibrator. Grafik: Fraunhofer IPA

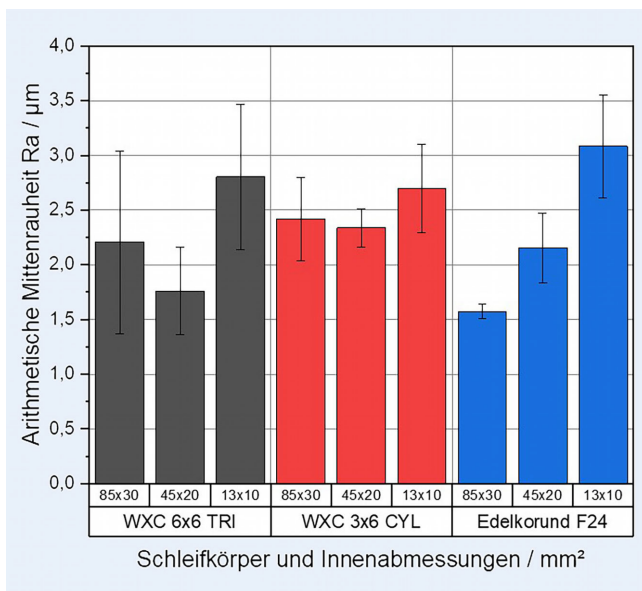


Bild 7. Arithmetische Mittenrauheit abhängig von verschiedenen Innenabmessungen. Grafik: Fraunhofer IPA

verwendeten Schleifkörper nahezu identisch ist. Diese ist vergleichbar mit der druckrauen Oberflächenqualität vor Beginn der Bearbeitung. Daraus folgt, dass die innere Oberfläche in diesem Bereich keine signifikante Bearbeitung erfahren hat. Abgesehen davon, liefert der Korundsand das beste Resultat unter den verwendeten Schleifmitteln. Dadurch, dass der Korundsand das kleinste Schleifmittel in der Versuchsreihe ist, wurden mit ihm die besten Ergebnisse in dem größten Durchmesser 85 x 30 mm² erzielt. Die zweitbesten Ergebnisse hat WXC 6x6 TRI erzielt. Die Unterschiede zu WXC 3x6 CYL sind jedoch nur minimal und bestätigt die Ergebnisse aus Versuch 1 noch einmal. Trotz der größeren Masse, liefern die Schleifkörper schlechtere Ergebnisse als bei einer Bearbeitung mit Korundsand.

Problematisch ist vor allem bei kleinen Durchmessern, dass das im Vergleich zum Korundsand deutlich größere Schleifgranulat sich nicht frei bewegen kann. Durch die eingeschränkte Bewegungsfreiheit wird das Bearbeitungsergebnis immer weiter reduziert. Für ein besseres Bearbeitungsergebnis muss also die Bewegungsfähigkeit des Granulates verbessert werden. Grundsätzlich

existieren mehrere Ansätze, um die Beweglichkeit der Schleifkörper zu erhöhen. Unterteilt werden können diese in eine Änderung der Art der Schleifkörper (Größe und Form) und die Bewegungsart des Schleifgutes. Um die Fließeigenschaften zu verbessern, können Kugeln mit kleinen Durchmessern dem Granulat hinzugefügt werden. Jedoch wird das finale Ergebnis neben den Fließeigenschaften des Granulates vor allem von den Innenabmessungen des Bauteils sowie der Abrasivität und der Masse des Schleifgranulates abhängen. Dies ist aufgrund der bisherigen Versuchsergebnisse zu erwarten.

Zusammenfassend haben die durchgeführten Versuche gezeigt, dass die Oberflächenqualität von mehreren Faktoren abhängt: Im Besonderen die Auswahl der Schleifmittel hat einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der Außen- und Innenflächen. Auf ein ähnliches Ergebnis kommen auch Radziejewska *et al.*. Auch hier hängen die Bearbeitungsergebnisse stark von den verwendeten Schleifkörpern ab. [7] Die Bearbeitung von Innenflächen wird gerade bei zunehmend kleineren Dimensionen deutlich schwieriger. Zu einer ähnlichen Erkenntnis kamen auch Khorasani *et al.* nach deren Untersuchungen. Auch hier wurde nachgewiesen, dass die Bearbeitung von Innenflächen deutlich herausfordernder ist als die von Außenflächen. Die Rauheit ist höher und mit der Prozesszeit nicht skalierbar. Im Unterschied zu diesem Beitrag, sind bei Khorasani *et al.* die Bauteile bei der Innenflächenbearbeitung lose in das Granulat gelegt. Für diesen Beitrag wurde zudem eine feste Einspannung der Bauteile berücksichtigt. Das lose Einlegen in das Granulat, kann von Vorteil sein, da so ein Verkleben des Schleifgranulates vermieden werden kann. Dies kann auch mit einer beweglichen festen Einspannung realisiert werden, wenn das Bauteil beispielsweise mittels einem Roboterarm gleichzeitig durch das fließende Granulat bewegt oder regelmäßig aus dem Behälter gehoben wird, um eingefangenes Granulat aus Öffnungen zu entfernen. Dies muss jedoch in weiteren Untersuchungen geprüft werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Untersuchung wurden mehrere metallische 3D-gedruckte Bauteile aus unterschiedlichen Werkstoffen mittels Gleitschleifen mit diversen Granulaten nachbearbeitet. Grundsätzlich hat sich in diesem Beitrag wie bei anderen Untersuchungen

gen gezeigt, dass Gleitschleifen für die Nachbearbeitung von additiv gefertigten Metallbauteilen geeignet ist. [4, 6, 7]

Nachfolgend sind die wichtigsten Erkenntnisse noch einmal kurz zusammengefasst:

- Die Versuche haben gezeigt, dass der Treppenstufeneffekt sich mit Gleitschleifen reduzieren lässt, auch bei schwierig zu bearbeitenden Materialien wie Titan.
- Die Außenseiten von Stahl und Aluminium lassen sich besonders effektiv mittels Gleitschleifen nachbearbeiten. Hier können gute Ergebnisse bei einer vertretbaren Prozesszeit erreicht werden. Als problematisch stellt sich vor allem Titan dar. Bei der untersuchten Legierung hat sich die Nachbearbeitung als möglich erwiesen, jedoch mit einer deutlich längeren Bearbeitungszeit.
- Die Masse und Form der Schleifkörper hat einen großen Einfluss auf die Bearbeitungsfähigkeit, vor allem bei Außenflächen.
- Bei Innenflächen spielt vor allem die Größe des Granulates und damit die Beweglichkeit eine entscheidende Rolle. Eine entsprechende Granulatbewegung an den Innenflächen zu erreichen ist eine große Herausforderung. Es müssen die Dimensionen der Schleifkörper, des Bauteils sowie die Fließbewegung des Granulates und die Einspannung berücksichtigt und abgestimmt werden. Die Bearbeitung ist im Vergleich zur Außenfläche deutlich erschwert.
- Der industrielle Benchmark Prozess funktioniert aktuell am besten bei der Bearbeitung von Außenflächen. Für Innenflächen hat Korundsand die besten Ergebnisse erzielt. Allgemein wird hier ein großes Verbesserungspotenzial gesehen.
- Die Linienkennwerte für die Rauheit (hier arithmetische Mittenrauheit R_a) haben eine gute Aussagekraft. Jedoch lässt sich die Qualität der Ergebnisse und deren Aussagekraft durch flächige Auswertemethoden wie die arithmetische Höhe S_a verbessern.
- Die Bauteilorientierung im Verhältnis zur Fließrichtung des Granulates hat einen Einfluss auf die Bearbeitungsqualität der Oberflächen. Dieser Effekt nimmt mit zunehmender Bearbeitungszeit ab. Eine entsprechende Anpassung der Orientierung kann die Bearbeitungszeit verringern.

Um diese identifizierten Herausforderungen noch weiter zu optimieren, werden aktuell drei Ansätze verfolgt:

1. Die Auswahl und Untersuchung verschiedener Compounds, um die Oberflächenqualität weiter zu verbessern und gegebenenfalls die Bearbeitungszeit zu verkürzen. Hiermit sollen schwer zu bearbeitende Oberflächen wie Titan besser und wirtschaftlich nachgearbeitet werden können.
2. Auswahl geeigneter Schleifkörper und Kombinationen (siehe Benchmarkprozess), um die Bearbeitung von Innenflächen zu ermöglichen. Dabei ist auf die Größe der Schleifkörper zu achten, um die Einschränkungen in Form von Verklemmungen, gerade bei der Bearbeitung von Innenflächen, zu reduzieren. Um diese Einschränkungen eliminieren zu können, bedarf es weiteren Untersuchungen, um die Fließeigenschaften des Granulats beispielsweise mittels eingebrachten Kugeln zu verbessern. Hier muss ein Optimum zwischen Abtragsleistung und Fließfähigkeit identifiziert werden. Zusätzlich kann der Wechsel auf eine Anlage mit angepasster Schleifkörperbewegung die

Strömungseigenschaften des Granulats so verändern, dass bauteilabhängig auch eine bessere Bearbeitung von Innenflächen ermöglicht wird.

3. Die zusätzliche Bewegung von Bauteilen während dem Gleitschleifen kann die Abtragsleistung weiter erhöhen. Diese Bewegung kann beispielsweise mittels Roboterarm erreicht werden.

Zusammengefasst zeigt der Beitrag, dass Gleitschleifen grundsätzlich als Nachbearbeitungsmethode für den metallischen 3D-Druck geeignet ist. Gerade auf den Außenflächen können sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Die Autoren sind zuversichtlich, dass durch eine geeignete Prozessgestaltung und -entwicklung (Auswahl Granulat, Prozessparameter und Compound) der Prozess für herausfordernde Werkstoffe wie Titan oder anspruchsvollen Innenflächen noch weiter verbessert werden kann.

FÖRDERHINWEIS

invest  bw



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, ARBEIT UND TOURISMUS

Das Forschungsprojekt „Clean3D“ wurde im Rahmen des Förderprogramms „Invest BW“ mit Mitteln des Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg (WM BM) gefördert und vom Projektträger VDI/VDE-IT betreut. Der Dank der Autoren geht an das Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg für die gewährte Förderung. Ein besonderer Dank gilt dem Projektpartner IPS-Innovative Produktionssysteme GmbH für die gute Zusammenarbeit. Daneben gilt der Dank der Autoren dem Projektträger und allen beteiligten Projektmitarbeitenden sowie allen beteiligten Unternehmen für die Unterstützung.

Literatur

- [1] Gebhardt, A.: Additive Fertigungsverfahren. Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion. München: Hanser 2016
- [2] Bagehorn, S.; Wehr, J.; Maier, H. J.: Application of mechanical surface finishing processes for roughness reduction and fatigue improvement of additively manufactured Ti-6Al-4V parts. International Journal of Fatigue 102 (2017), S. 135–142
- [3] Berger, U.; Hartmann, A.; Schmid, D.: 3D-Druck - Additive Fertigungsverfahren. Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Rapid Manufacturing. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel - Nourney Vollmer GmbH & Co. KG 2023
- [4] Nalli, F.; Bottini, L.; Boschetto, A. et al.: Effect of Industrial Heat Treatment and Barrel Finishing on the Mechanical Performance of Ti6Al4V Processed by Selective Laser Melting. Applied Sciences 10 (2020) 7, S. 2280
- [5] Klocke, F.: Fertigungsverfahren 2. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2018
- [6] Khorasani, M.; Ghasemi, A. H.; Farabi, E. et al.: A comprehensive investigation of abrasive barrel finishing on hardness and manufactura-

bility of laser-based powder bed fusion hollow components. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 120 (2022) 5-6, S. 3471–3490

- [7] Radziejewska, J.; Marczak, M.; Maj, P. et al.: Influence of post-processing on surface texture of additive manufacturing micro-elements. XIV INTERNATIONAL CONFERENCE ELECTROMACHINING 2023, Bydgoszcz, Poland, 2024, S. 20031
- [8] Rosswag GmbH: Titanlegierung TiAl6V4. Internet: <https://www.rosswag-engineering.de/werkstoff-titanium-alloy-tial6v4>. Zugriff am 31.07.2024
- [9] EOS GmbH: EOS Aluminium AlSi10Mg. Material Data Sheet. Internet: https://www.eos.info/03_system-related-assets/material-related-contents/metal-materials-and-examples/metal-material-datasheet/aluminium/material_datasheet_eos_aluminium-alsi10mg_en_web.pdf. Zugriff am 31.07.2024



Sascha Stribick

Tel. +49 711 / 970 1108

sascha.stribick@ipa.fraunhofer.de

Foto: Fraunhofer IPA / Rainer Benz

Stanislaw Shenberg-Stotz

Erik Dieringer

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik
und Automatisierung IPA
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
www.ipa.fraunhofer.de

LIZENZ



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

