

## **Titel**

# **Technologieentwicklung kryogener Entgratungsstrategien für metallische Werkstoffe**

IGF-Nr.: 20730 N

---

## **Forschungseinrichtung**

Forschungseinrichtung: Lehrstuhl für Ressourcen- und Energieeffiziente Produktionsmaschinen (REP), Fürth



Ansprechpartner

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp  
Telefon: +49 (0)911 / 65078 64810  
E-Mail: nico.hanenkamp@fau.de

## **Danksagungen**

Das IGF-Vorhaben 20730 N der Forschungsvereinigung Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. – FGW, Papenberger Straße 49, 42859 Remscheid wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



---

## Ausgangssituation

Um steigenden Anforderungen an Bauteilkosten, -qualität und -lieferzeiten gerecht zu werden, müssen alle Potenziale in der Wertschöpfungskette zur Effizienzsteigerung genutzt werden. Insbesondere die Entfernung von verfahrensbedingten Fertigungsrückständen bzw. Werkstoffanhaftungen wie Grate oder Stützstrukturen, welche bei der subtraktiven oder additiven Formgebung von Werkstücken entstehen und über die geforderte Werkstückoberfläche hinaus ragen, führen zu zusätzlichen Vor- und Nachbehandlungsprozessen und können die Bauteilmontage bzw. die Funktion einschränken [1, 2].

Durch Gratbildung und den damit verbundenen Mehraufwand kommt es zu hohem zusätzlichen Aufwand, der bei der Montage im Maschinenbau zwischen 20 % und 40 % der Arbeitszeit beanspruchen kann [1]. Die anteiligen Kosten zur Entgratung können bis zu 10 % der gesamten Herstellkosten betragen, dies entspricht über 500 Mio. €/Jahr allein in Deutschland [3]. Gerade die Entfernung von schwer zugänglichen Graten bspw. bei Querbohrungen ist zeit- und kostenintensiv und kann die Herstellkosten bis zur Unwirtschaftlichkeit erhöhen [4].

Der Gratvermeidung, -minimierung und -beseitigung wird trotz hoher Folgekosten wenig Aufmerksamkeit gewidmet. Hinsichtlich der Zerspanung wurden bereits zahlreiche Untersuchungen durchgeführt, die Gratbildung während des Bearbeitungsprozesses zu verstehen und zu minimieren [5–12]. Obwohl zur Prävention der Gratbildung bereits eine Vielzahl an Strategien existiert, lässt sich das Auftreten von Graten nicht vollständig vermeiden [5, 13]. Daher muss die Weiterentwicklung technischer Lösungen für effektive Entfernungsprozesse vorangetrieben werden [1]. In der industriellen Praxis haben sich aufgrund der unterschiedlichen Graterscheinungen und Anforderungen an deren Beseitigung einerseits mechanische, zu der auch die spanenden Entgratverfahren zählen, andererseits thermische, chemische oder elektrische Verfahren mit teils aufwendiger und somit kostenintensiver Anlagentechnik etabliert [5]. Bei allen Verfahrensvarianten wird die Gesamtdurchlaufzeit der Bauteile gesteigert.

Da Grate bei identischer Werkstückgeometrie und -bearbeitung nicht reproduzierbar auftreten, muss die Entgratung bei thermischen und hochdruckbasierten Verfahren unabhängig vom tatsächlich vorhandenen Grat erfolgen [1, 11]. Zwar gibt es Ansätze für eine reproduzierbare Gratbildung bei bestimmten Prozessen [10], die Vielfalt potenzieller Grate an realen Werkstücken lässt sich damit jedoch nur sehr begrenzt abdecken. Oft werden verfahrensbedingt über die reine Entfernung des Grates hinaus geometrische Formen an Kanten erzeugt, die für viele technische Erzeugnisse nicht erforderlich sind.

Der aufzubereitende Sondermüll, welcher durch die in automatisierten Entgratungsprozessen eingesetzten Prozessmedien entsteht, ist ebenfalls als problematisch einzustufen. Als Alternative existiert die spanende Entgratung, die bei manueller Durchführung ein hohes Risiko für Sekundärbeschädigungen darstellt. Eine 2017 vom Lehrstuhl REP durchgeführte Umfrage zur Praxis der Entgratungstechnik unter 1350 Ausstellern, Teilnehmern und Interessenten der Fachmesse für Entgratungstechnologie und Präzisionsoberflächen (DeburringEXPO) hat gezeigt, dass ca. ein Drittel der Entgratungsprozesse gerade bei KMU spanend und manuell durchgeführt werden () und bestätigt damit die Einschätzung aus Untersuchungen von Beier [1, 14].

Unabhängig vom technologischen Verfahren sehen die befragten Unternehmen Entwicklungsbedarf in Bezug auf ressourcenschonende Technologien in Kombination mit adäquaten Automatisierungskonzepten. Mehrachsige Bearbeitungszentren und Industrieroboter bieten hinsichtlich der Automatisierung von Entgratvorgängen durch gleichbleibende Qualität und vollständige Entgratung Potential [15].

Auch bei Stützstrukturen in der additiven Fertigung, die oft Supports oder Hilfsstrukturen genannt werden, handelt es sich um unerwünschte Fertigungsrückstände am Bauteil. Diese sind während der Fertigung essentiell um u.a. Eigenspannungen aufzunehmen oder den Aufbau überhängender Strukturen überhaupt erst möglich zu machen [16, 17]. Die Strukturen haften, teils auch über eine Sollbruchstelle, am Werkstück an und ragen weit über dieses hinaus. Dadurch ergibt sich eine Ähnlichkeit zu einigen Graterscheinungen. Stützstrukturen können verschiedenartige Architekturen und Perforationen aufweisen.

In Hinblick auf additiv gefertigte Bauteile gibt es seit längeren Bestrebungen die Entfernbarekeit von verfahrensbedingten Stützstrukturen zu erleichtern, automatisiert mit mechanischen bzw. chemischen Verfahren zu entfernen oder gänzlich zu vermeiden [18–23]. Zahlreiche Bauteile müssen jedoch in Abhängigkeit des gewählten Verfahrens weiterhin mit Stützstrukturen gefertigt werden [17]. Verfahren zur Entfernung sind aktuell kaum automatisiert [24]. Die Entfernung muss daher nach heutigem Stand hauptsächlich manuell erfolgen, was zu hohem Aufwand und Nachbearbeitungskosten führt [16, 17, 25, 26].

Da die Kosten primär von der Komplexität des Bauteils und der Anzahl der Stützstrukturen abhängig sind, existieren hierzu keine allgemeingültigen quantitativen Angaben. Weil sich die Entfernung gerade von metallischen Stützstrukturen schwierig gestaltet, kann die manuelle Nacharbeit von Bauteilen selbst im Durchmesserbereich bis  $d = 40$  mm mehrere Arbeitstage in Anspruch nehmen [25]. Durch die Fertigungskosten in Abhängigkeit des Bauteilvolumens, nimmt dies gerade für Bauteile mit hohem Oberflächen/Volumen-Verhältnis den dominierenden Kostenanteil ein. Darüber hinaus muss das Bauteil anschließend von weiteren Fertigungsrückständen gereinigt werden [2]. Die automatisierte Entfernung von Werkstückanhaftungen metallischer Werkstoffe mittels Kohlendioxidstrahlen stellt einen Ansatz dar, der bisher

wenig erforscht ist. Bei der kryogenen Strahltechnologie werden feste CO<sub>2</sub>-Partikel in der Regel durch Druckluft beschleunigt (Abbildung 1, links).

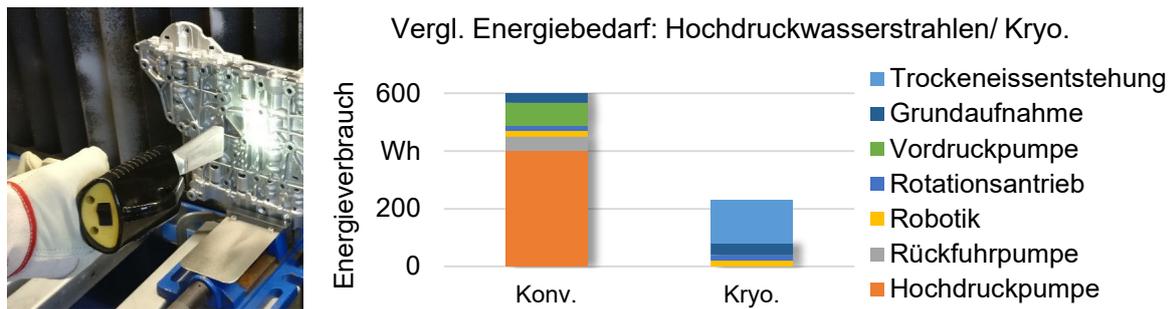


Abbildung 1: Kryogenes Entgraten einer Ventilplatte aus Aluminium (links), Substitution energieintensiver Komponenten bei Hochdruckwasserstrahlen (rechts) [27]

Die festen Partikel sublimieren und hinterlassen ein trockenes und montagefähiges Bauteil. Ressourcenintensive Trocknungs- und Reinigungsprozesse, welche durch die Kontamination der eingesetzten Medien während etablierter Entgratetechniken entstehen, können eliminiert werden. Kohlendioxid ist farb- und geruchslos, ungiftig und nicht brennbar. Das als Abfallprodukt gewonnene CO<sub>2</sub> kann vollkommen klimaneutral weiterverwertet werden. In vielen Anwendungsbereichen konnte sich das Strahlen mit Kohlendioxid bereits etablieren, allerdings sind die Einsatzpotenziale derzeit längst nicht ausgeschöpft.

Nach einer 2010 erschienenen Studie des Fraunhofer-Instituts für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik besitzt das Strahlen mit CO<sub>2</sub> großes Potential bei der automatisierten Entgratung in der Automobilindustrie [28]. Durch den simplen Aufbau der Strahltechnik und der bereits vorhandenen Druckbeaufschlagung durch die Verwendung von CO<sub>2</sub> als Rohstoff in flüssiger Phase wird die Automatisierung begünstigt [29].

Bisherige Untersuchungen wenden die kryogene Entgratung ausschließlich für die Kunststoffbearbeitung an, darüber hinaus sind keine neueren Bestrebungen bekannt [30]. Im Rahmen von eigenen Vorversuchen ist die vollständige Gratentfernung für verschiedene, metallische Werkstoffe nachgewiesen worden (Abbildung 2) [31].

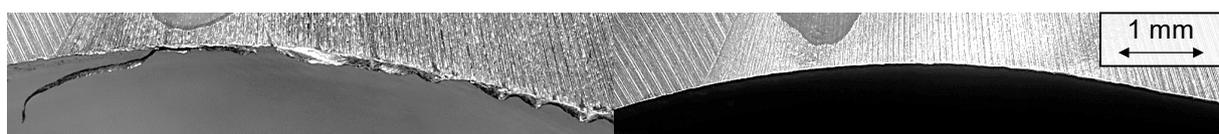


Abbildung 2: Gratbehaftetes Aluminiumbauteil (links); Entgratung durch CO<sub>2</sub>-Strahlen (rechts)

Auch für die Entfernung von Stützstrukturen aus AlSi10Mg wurden Voruntersuchungen durchgeführt (Abbildung 3). Dabei konnten die Stützstrukturen vollständig abgetragen werden, ohne die Werkstückoberfläche zu schädigen. Die Prozesszeit im Bild beträgt mit  $t = 60$  s nur einen Bruchteil zur üblichen Methodik, welche aus manueller Entfernung, Sandstrahlen und der Reinigung mit Druckluft besteht.

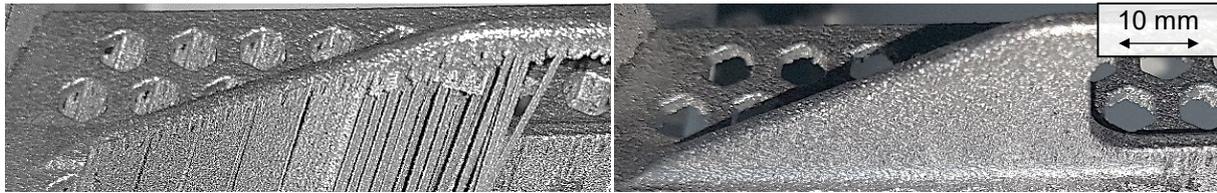


Abbildung 3: Stützstrukturen (links); Entfernung der Stützstrukturen durch CO<sub>2</sub>-Strahlen (rechts)

Während vorangegangener Untersuchungen wurde festgestellt, dass eine Systematik in Form von angepassten Verfahrensparametern und individuellen Strahlstrategien in Abhängigkeit der vorliegenden Anhaftungserscheinung erforderlich ist. Durch Bestrahlung der Materialanhaftungen von verschiedenen Richtungen konnte die Entfernung zusätzlich verbessert oder überhaupt erst möglich gemacht werden.

Durch Substitution des Hochdruckwasserstrahlens mit einem kryogenen, CO<sub>2</sub>-basierten Strahlprozess kann durch die geringere Komplexität der Anlage der Energieverbrauch deutlich reduziert werden, da energieintensive Pumpen entfallen (Abbildung 1, rechts). Bis Projektbeginn existierte keine durchgängige Systematik basierend auf dieser Prozessplanung.

---

### Forschungsziel

In diesem Forschungsvorhaben erfolgte daher eine gezielte Technologieentwicklung zur Entfernung von verfahrensbedingten Fertigungsrückständen für metallische Werkstoffe durch CO<sub>2</sub>-Strahlen. Um die Übertragbarkeit und den unternehmensübergreifenden Wissenstransfer zu realisieren, wurden für definierte Anhaftungen Prozessfenster identifiziert und in der Praxis validiert. Durch diesen Ansatz wurde es auch für KMU möglich, die kryogene Nachbearbeitungstechnologie als Alternative zu konventionellen Verfahren für individuelle Werkstücke im Rahmen der Prozessplanung zu evaluieren.

---

### Vorgehensweise und Forschungsergebnisse

Die prinzipielle Vorgehensweise ist in Abbildung 4 dargestellt. Zur technischen Umsetzung wurde eine Demonstratoranlage im Technikum des Lehrstuhls REP realisiert. Anhand von Versuchen an entwickelten Probekörpern wurden geeignete Prozessfenster identifiziert.

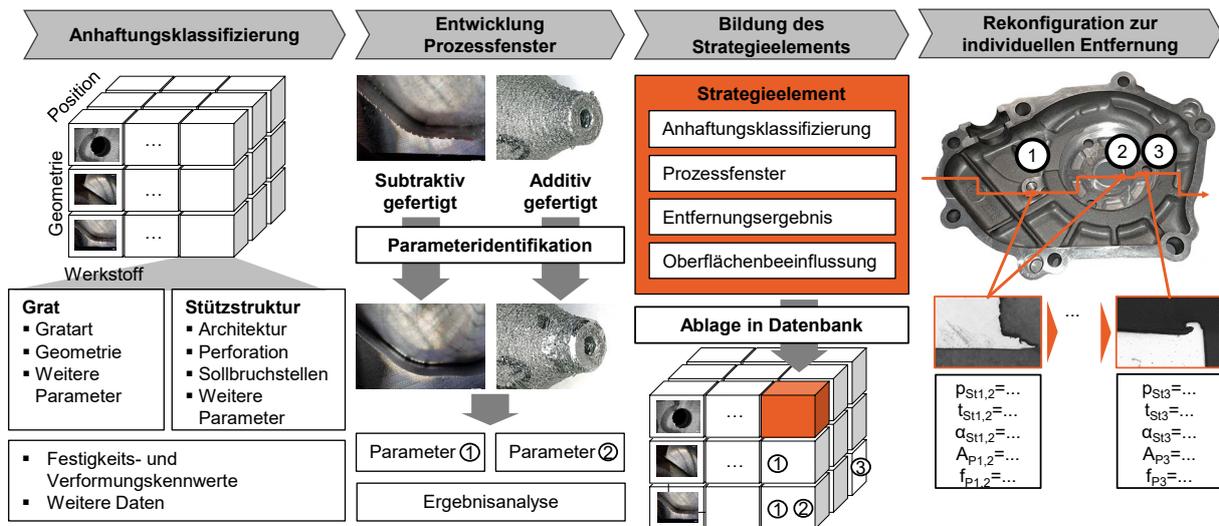


Abbildung 4: Prinzipielle Vorgehensweise innerhalb des Projekts CRYOREM

Durch die Vorgehensweise ist es dem Anwender möglich, auf ideale Prozessfenster zuzugreifen und bereits im Vorfeld das Bearbeitungsergebnis einschätzen zu können. Für die Anwendung genügt es, vorliegende Grattypen einzuordnen und die Positionen festzustellen. Die entwickelte Technologie kann sowohl für die Serien- als auch für die Einzelteilmontage eingesetzt werden. Zunächst war es jedoch in der Entwicklungsphase erforderlich, entsprechende Wiederholgenauigkeiten für statistisch abgesicherte Versuchsergebnisse zu gewährleisten, weshalb eine Bahnführung mit entsprechender Steuerung des Versuchsaufbaus entwickelt und realisiert wurde. Aufgrund der nachgewiesenen, deutlich höheren Leistungsfähigkeit der Trockeneistechnologie wurde diese ausgewählt.

Basierend auf den genannten Anforderungen und der individuellen Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss wurde der automatisierte Trockeneisstrahlprüfstand realisiert. Der Prüfstand bestand primär aus der Strahlanlage Kärcher IB15/120, dem Industrieroboter ABB IRB 1600 und der Filteranlage AFS 1000 C. Für die Integration der Komponenten wurden geeignete Schnittstellen entworfen.

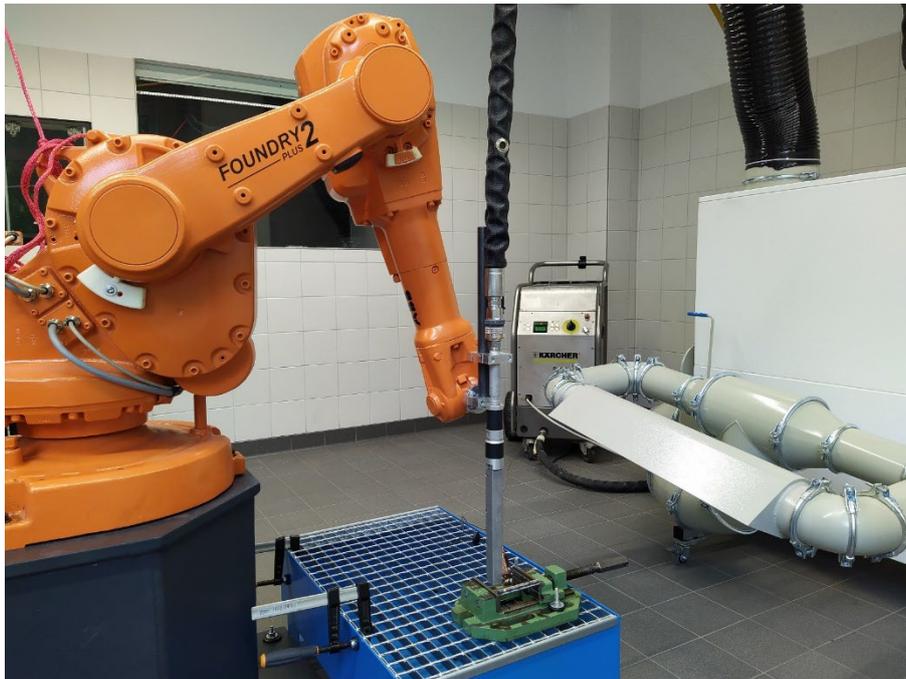


Abbildung 5: Realisierter Trockeneisstrahlprüfstand im Technikum des REP

Es folgte eine grundlegende Validierung des Aufbaus. Aufbauend auf vorangegangenen Untersuchungen wurden weitere Möglichkeiten zur Ermittlung der prozessualen Eigenschaften des Prüfstands verwendet. Wesentlicher Wirkmechanismus beim Strahlen mit Trockeneis zur Entfernung von Graten stellt die Strahlstoßkraft bzw. die Impulsübertragung dar. Zur Messung der Strahlstoßkraft wurde ein gesonderter Prüfstandsaufbau entwickelt. Es wurden in Abhängigkeit der wesentlichen Strahlparameter wie Druck und CO<sub>2</sub>-Durchsatz Strahleigenschaften und optimale Prozessfenster hinsichtlich des höchsten Wirkungsgrads und der Wirtschaftlichkeit identifiziert.

Anschließend wurden für die Versuchsdurchführung, aufbauend auf Erkenntnissen und durchgeführten Klassifizierungen, Grate spanend erzeugt, wobei Fräs- und Bohrgrate berücksichtigt wurden. Als Werkstoffe wurden Baustahl 1.0038, Edelstahl 1.4404 und Aluminium 3.1645 verwendet. Die Gestaltung der additiv gefertigten Probekörper für die Untersuchung von Stützstrukturen erfolgte anhand einer ausgewählten Anforderungsliste. Für den Erkenntnisgewinn in Bezug auf das Trockeneisstrahlen als Entfernungstechnologie ist ein breites Spektrum von Supportstrukturen zu untersuchen.

Zur systematischen Identifikation geeigneter Prozessfenster zur Entfernung der synthetisch erzeugten Gratbilder und Supportstrukturen wurden diese mit Strahlparameterkombinationen mit einer vollfaktoriellen Versuchsplanung untersucht. In den Untersuchungen zeigte sich eine starke Abhängigkeit des Entgratungsergebnisses von der Bestrahlungsrichtung. Bei der Wahl von nur einem konstanten Bestrahlungswinkel entlang der Fräskante mit konstantem Vorschub wird der Grat insbesondere bei duktilen Werkstoffen nur an die Werkstückkante gebogen und verbleibt am Werkstück. Durch die Verwendung von zwei aufeinanderfolgenden Bestrahlungswinkeln, womit der Grat zunächst entgegen seiner Entstehungsrichtung zurückgebogen wird und anschließend in der Winkelhalbierenden der Werkstückkante bestrahlt wird, ist eine deutliche Steigerung der Entgratungsleistung möglich.

Es hat sich gezeigt, dass ein erster Winkel von 225° und ein zweiter Winkel von 135° (Modul 3, Abbildung 6) bezogen auf die Gratentstehungsebene zu effektiven

Entgratungsergebnissen führt. Eine weitere periodische Variation der Strahlwinkel führt zu keiner weiteren signifikanten Verbesserung. Die Gegenüberstellung der verschiedenen Winkelkombinationen ist in Abbildung 6 dargestellt. Die Winkelkombination Modul 3 wurde hinsichtlich der Entgratung für alle weiteren Versuche festgelegt.

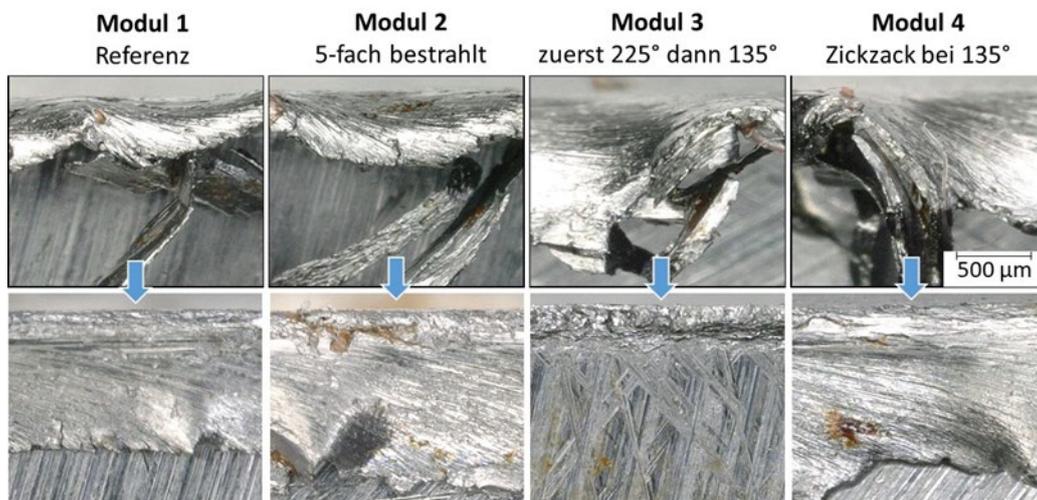


Abbildung 6: Verschiedene Bestrahlungsstrategien zur Steigerung der Abtragsleistung

Bei den Entgratungsversuchen wurden Grate mit Gratfußbreiten von bis zu 200 µm bestrahlt. In Abbildung 7 sind Grate verschiedener Werkstoffe dargestellt. Abgebildet sind die Werkstoffe Aluminium EN AW 2007 (links), der Baustahl 1.0038 (S235JR, mitte) sowie der Edelstahl 1.4404 (X2CrNiMo17-12-2, rechts).

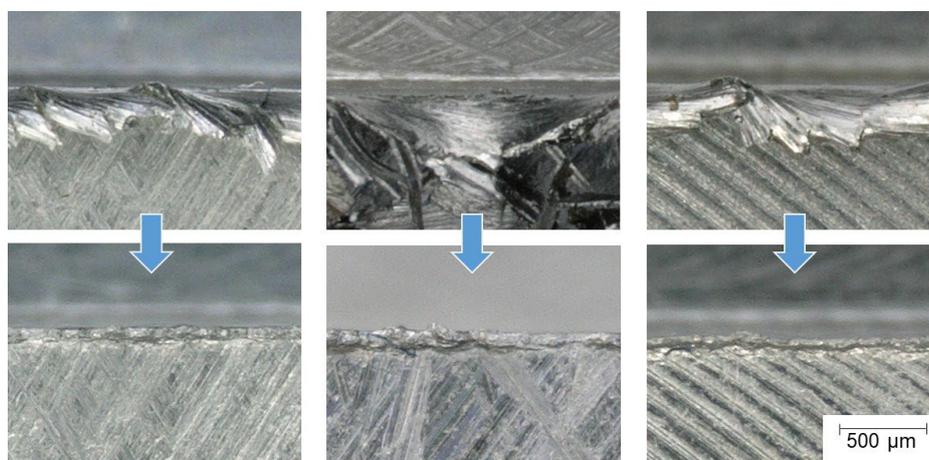


Abbildung 7: Ergebnisse bei der Bestrahlung von Graten

In Abbildung 7 sind bei allen drei Werkstoffen vor der Bestrahlung zusammenhängende Grate verschiedener Form dargestellt. Die Grate verfügen über eine feste Anbindung von ca. 100 µm Gratfußbreite an der Werkstückoberfläche. Durch die Bestrahlung mit Trockeneis können diese am Gratfuß entfernt werden. Mit steigender Gratfußbreite ist erkennbar, dass die Fußbreite über die Gratlänge nicht konstant ist. Dies führt insbesondere bei hohen Gratfußbreiten zu verbliebenem Werkstoffmaterial, welches über den Gratfuß hinausragt. In den Untersuchungen hat sich bisher gezeigt, dass Gratfußbreiten bei Aluminium bis ca. 200 µm, bei Stahl bis ca. 125 µm und bei Edelstahl bis ca. 100 µm sicher entfernt werden können. Darüber hinaus erhöht sich auch mit maximalen Strahlparametern und niedriger Vorschubgeschwindigkeit die Wahrscheinlichkeit von Materialanhaftungen über dem Gratfuß hinaus bzw. zu einem stark unregelmäßigen Gratfuß.

Hinsichtlich der Supportstrukturen wurden vier unterschiedliche Geometrien untersucht, bei allen Geometrien wurden unterschiedliche Materialdicken aus AlSi10Mg bestrahlt. Linienförmige Supports konnten bis zu einer Wandstärke von 0,5 mm entfernt werden. Quadratische Supports konnten bis zu einer Kantenlänge von 1,5 mm, runde Anbindungen konnten bis zu einem Durchmesser von 0,75 mm entfernt werden. Es hat sich gezeigt, dass die Wandstärke den primären Einfluss auf die Entfernbare darstellt. Die Länge der Anbindung des Supports an die Bauteiloberfläche beinhaltet einen deutlich geringeren Einfluss.

Abschließend wurde eine Validierung des entwickelten Verfahrens anhand mit dem Projektausschuss festgelegten Bauteilen und individuell festgelegter Bearbeitungsstrategie durchgeführt. Dadurch konnte fallspezifisch geprüft werden, ob die Referenzbauteile durch die werkstückindividuelle kryogene Entgratung bzw. Entstützung produktiver und damit kostengünstiger und/oder mit einer höheren Bearbeitungsqualität hergestellt werden können.

Abbildung 8 zeigt die Entgratungsergebnisse an einem Realbauteil. Oben im Bild ist die Ausgangssituation dargestellt. Durch die Bestrahlung mit Trockeneis können die Grate bis zum Gratfuß entfernt werden. Eine Analyse der Oberfläche vor und nach der Bestrahlung führt zu keiner signifikanten Änderung der Oberflächenkennwerte.

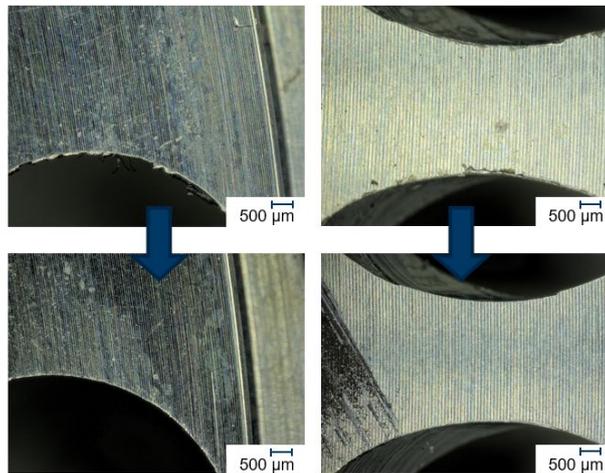


Abbildung 8: Entgratung von ausgewählten Realbauteilen, Versuchsergebnisse

Bei den Ergebnissen zeigt sich für den Werkstoff Aluminium eine klare Analogie zu den Ergebnissen mit synthetischen Versuchsprobekörpern. Die untersuchten Grate können bis zum Gratfuß entfernt werden. Bei der Verwendung von Trockeneispartikeln mit Durchmesser  $d_p = 3$  mm, kommt es jedoch zu einer starken Oberflächenbeeinflussung.

Zusammenfassend betrachtet können die Ergebnisse aus der Prozessfensteridentifikation bestätigt werden. Typische Aluminiumgrate in der Zerspanung können bis zum Gratfuß entfernt werden. Für Stahlgrate sind angepasste Strahlwinkel und Strahlwinkelkombinationen für die erfolgreiche Beseitigung erforderlich.

Im Rahmen der Validierung hinsichtlich der Entstützung von Referenzbauteilen wurden metallische Bauteile aus AlSi10Mg und Inconel 718 untersucht. Die Bauteile verfügten über variierende Supportformen, Anbindungstypen und Wandstärken, weshalb eine Übertragung von Prozessfenstern aus vorangegangenen Untersuchungen nicht möglich war. Deshalb wurde ein ideales Prozessfenster identifiziert oder mit maximalen Strahlparametern bestrahlt. Es zeigt sich bei AlSi10Mg eine erfolgreiche Entfernung von Supportstrukturen bis zu einer Wandstärke von 2 mm. Die Supportstrukturen lösen sich, ähnlich zu der manuellen Entfernung, an der Sollbruchstelle zur Oberfläche ab. Deshalb

ist wie bei der manuellen Entfernung mit Restmaterial an der Bauteiloberfläche zu rechnen.

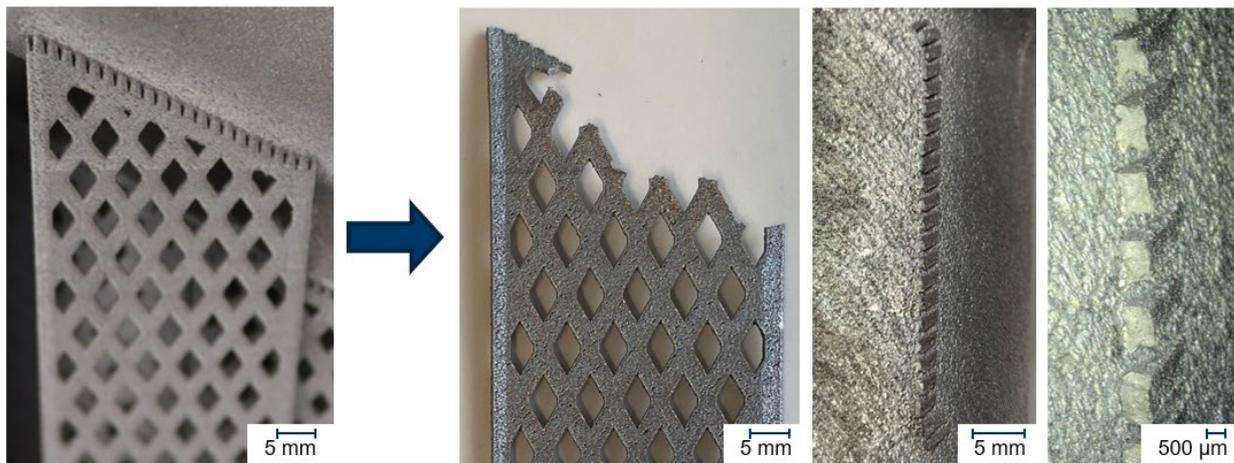


Abbildung 9: Entstützung von ausgewählten Realbauteilen, Versuchsergebnisse

---

## Zusammenfassung

Nach Abschluss des Forschungsvorhabens stehen potentiellen Anwendern Informationen über die entwickelte Technologie zur Entfernung von Graten oder Supports durch Trockeneisstrahlen zur Verfügung.

Innerhalb des Projekts konnten zusammenfassend folgende Inhalte erarbeitet werden:

- Durch messtechnische Analyse des Strahlprüfstands wurde eine quantitative Beschreibung des realen Trockeneisstrahlprozesses ermöglicht.
- Innerhalb der Bestrahlung von Graten konnte eine starke Abhängigkeit des Entfernungsergebnisses von der Bestrahlungsrichtung und verschiedenen Kombinationen dieser festgestellt werden.
- Für unterschiedliche metallische Werkstoffe konnte gezeigt werden, welche Grate hinsichtlich ihrer geometrischen Eigenschaften maximal entfernt werden können und zu welchem Entfernungsergebnis die Entgratung führt. Die Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens wurden beleuchtet.
- Für unterschiedliche metallische Werkstoffe konnte gezeigt werden, welche Supportstrukturen hinsichtlich ihrer geometrischen Eigenschaften maximal entfernt werden können und zu welchem Entfernungsergebnis die Entstützung führt.
- Für verschiedene subtraktiv und additiv gefertigte metallische Werkstoffe konnte gezeigt werden, welche Oberflächenmodifikationen hinsichtlich optischer Veränderungen, Rauigkeit und oberflächennahen Eigenspannungen durch den Trockeneisstrahlprozess unter Verwendung typischer Strahlparameter verursacht werden.
- Die entwickelte Technologie konnte erfolgreich bei Realbauteilen validiert werden.

---

Ein besonderer Dank gilt allen Mitgliedern im projektbegleitenden Ausschuss für die gute Zusammenarbeit und für die Unterstützung bei der Durchführung der Forschungsarbeiten.

Eine Langfassung der Forschungsarbeiten kann in Form eines Schlussberichts bei der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V., Papenberger Str. 49, 42859 Remscheid, [www.fgw.de](http://www.fgw.de), angefordert werden.

Weitere Informationen erhalten Sie bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp unter +49 (0)911 / 65078 64810.

### References

- [1] Beier, H.-M., Nothnagel, R., 2015. *Praxisbuch Entgrattechnik: Wegweiser zur Gratminimierung und Gratbeseitigung für Konstruktion und Fertigung*, 2nd edn. Hanser, München.
- [2] Busskamp, B., 2017. Die gedruckte Oberfläche — Strahlen additiv gefertigter Bauteile 57, p. 100.
- [3] Arrazola, P.J., 2010. Assessment of Deburring Costs in Industrial Case Studies, in *Burrs - Analysis, Control and Removal: Proceedings of the CIRP International Conference on Burrs, 2nd-3rd April, 2009, University of Kaiserslautern, Germany*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, p. 245.
- [4] Gillespie, L.K., 1999. *Deburring and edge finishing handbook*. Society of Manufacturing Engineers; American Society of Mechanical Engineers, Dearborn, Mich., Fairfield, NJ.
- [5] Aurich, J.C., Dornfeld, D., Arrazola, P.J., Franke, V. *et al.*, 2009. Burrs—Analysis, control and removal 58, p. 519.
- [6] Bu, Y., Liao, W.H., Tian, W., Shen, J.X. *et al.*, 2016. An analytical model for exit burrs in drilling of aluminum materials 85, p. 2783.
- [7] Cheng, J., Jin, Y., Wu, J., Wen, X. *et al.*, 2016. Experimental study on a novel minimization method of top burr formation in micro-end milling of Ti-6Al-4V 86, p. 2197.
- [8] Dornfeld, D., Min, S., 2010. A Review of Burr Formation in Machining, in *Burrs - Analysis, Control and Removal: Proceedings of the CIRP International Conference on Burrs, 2nd-3rd April, 2009, University of Kaiserslautern, Germany*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, p. 3.
- [9] Lee, K., Dornfeld, David, A, 2004. Micro-Burr Formation and Minimization through Process Control, in *Consortium on Deburring and Edge Finishing*.
- [10] Leitz, L., Franke, V., Aurich, J.C., 2009. Beherrschung der Gratbildung bei Bohrungsverschneidungen.
- [11] Link, R., 1992. *Gratbildung und Strategien zur Gratreduzierung bei der Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide*.
- [12] Zhang, T., Liu, Z., Xu, C., 2013. Influence of size effect on burr formation in micro cutting 68, p. 1911.

- [13] Aurich, J.C., Dornfeld, D., Editors, 2010. *Burrs - Analysis, Control and Removal: Proceedings of the CIRP International Conference on Burrs, 2nd-3rd April, 2009, University of Kaiserslautern, Germany*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [14] Amon, S., Gross, D., Hanenkamp, N., 2019. Bauteilfinishing durch CO<sub>2</sub>-Trockeneisstrahlen: Automatisierbare Nachbearbeitungsprozesse durch innovative Fertigungstechnologien.
- [15] Thilow, A., Berger, K., Prüller, H., Maier, R., Przyklenk, K., Schäfer, F., Pießlinger-Schweiger, S., 2016. *Entgratetechnik: Entwicklungsstand und Problemlösungen*, 5th edn. expert verlag, Renningen.
- [16] Kranz, J., 2017. *Methodik und Richtlinien für die Konstruktion von laseradditiv gefertigten Leichtbaustrukturen*.
- [17] Lachmayer, R., Lippert, R.B., Kaieler, S., 2018. *Additive Serienfertigung: Erfolgsfaktoren und Handlungsfelder für die Anwendung*. Springer Berlin.
- [18] Lathrope, S., Scovell, M., Skolnik, D. Methods of Additive Manufacturing using chemical removal of support structure(WO2017029276 (A1)).
- [19] Li, Z., Zhang, D.Z., Dong, P., Kucukkoc, I., 2017. A lightweight and support-free design method for selective laser melting 90, p. 2943.
- [20] Ploshikhin, V. Automated separation of support structures from a powder-bed-based additively manufactured component(DE102017101834 (A1)).
- [21] Schmithüsen, T., Eibl, F., Meiners, W. Verfahren zur werkzeuglosen Entfernung von Stützstrukturen bei der generativen Fertigung von Bauteilen, 2018(WO2018073259).
- [22] Schwandt, H., Weinhold, J., 2015. 3D-Druck - was ist wirklich möglich? Ein Blick aus der Anwenderperspektive - Teil 2 19, p. 6.
- [23] Spierings, A., Levy, G., 2009. Rapid Manufacturing - auch mit SLM 6.
- [24] Günster, J., 2013. Vakuum im Pulverbett ersetzt Stützstrukturen. Accessed 11 September 2018.
- [25] Lefky, C.S., Zucker, B., Wright, D., Nassar, A.R. *et al.*, 2017. Dissolvable Supports in Powder Bed Fusion-Printed Stainless Steel 4, p. 3.
- [26] Schmithüsen, T., Eibl, F., Meiners, W., 2017. Untersuchungen zum automatisierten Entstützen SLM-gefertigter Bauteile.
- [27] Häring, H.-W., Ahner, C., Belloni, A., 2008. *Industrial Gases Processing*. Wiley-VCH, Hoboken.
- [28] Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik, 2010. *Marktstudie Kohlendioxidstrahlen 2010*, Berlin.
- [29] Sherman, R., 2011. Cleaning with Carbon Dioxide Snow, in *Handbook for Critical Cleaning: Cleaning Agents and Systems, Second Edition*, CRC Press.
- [30] Uhlmann, E., Kretschmar, M., Elbing, F., Mihotovic, V., 2010. Deburring with CO<sub>2</sub> Snow Blasting, in *Burrs - Analysis, Control and Removal: Proceedings of the CIRP International Conference on Burrs, 2nd-3rd April, 2009, University of Kaiserslautern, Germany*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, p. 181.
- [31] Gross, D., Heinz, A., Amon, S., Meier, T. *et al.*, 2018. Investigation of Carbon Dioxide Based Blasting Technologies as Cryogenic Deburring Method for Titanium Alloy and Stainless Steel 882, p. 142.