

Patrick Delfs

Dreidimensionale Oberflächenanalyse und Topografie-Simulation additiv hergestellter Laser-Sinter Bauteile

**Forschungsberichte des
Direct Manufacturing Research Centers**

22

Dreidimensionale Oberflächenanalyse und Topografie-Simulation additiv hergestellter Laser-Sinter Bauteile

zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
M. Sc. Patrick Delfs
aus Göttingen

Tag des Kolloquiums: 17.12.2020

Referent: Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Schmid

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt

Forschungsberichte des Direct Manufacturing Research Centers
herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Schmid

Band 22

Patrick Delfs

**Dreidimensionale Oberflächenanalyse und
Topografie-Simulation additiv hergestellter
Laser-Sinter Bauteile**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Paderborn, Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7825-1

ISSN 2364-3072

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

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

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

Zusammenfassung

Anwendungen von Laser-Sinter Bauteilen als Sichtteile sind aufgrund der vergleichsweise schlechten Oberflächenqualität sehr begrenzt. In dieser Arbeit werden dreidimensionale Kennwerte benutzt, um die Oberflächenqualität von Laser-Sinter Bauteiloberflächen und die Einflüsse aus unterschiedlichen Bereichen der gesamten Prozesskette zu evaluieren. Beispielsweise wurden objektive Kennwerte, mit deren Hilfe Orangenhaut zu identifizieren ist, und Prozessparameter, die diese deutlich vermindern, gefunden. Mittels Durchführung von haptischen Versuchen wurde das subjektive Empfinden ermittelt und konnten zu objektiven Kennwerten korreliert werden. Eine mikroskopische Betrachtung des flachen Oberflächenwinkels mit verschieden farbigen Pulvern zeigt neue Erkenntnisse zum Anschmelzvorgang von Partikeln an die Schmelze. Zur nachträglichen Glättung von Oberflächen wurden mechanische, chemische und optische Nachbehandlungsmethoden verwendet und deren Potential aufgezeigt. Eine abschließende neuartige Simulation der dreidimensionalen Topografie bildet die Grundlage für ein Programm zur automatischen und funktionsgerechten Orientierung von Bauteilen, welche am Beispiel eines realen Bauteils erfolgreich validiert wurde. Zusammengefasst zeigen die Ergebnisse, dass die richtige Wahl von Bauorientierung und Prozessparametern entscheidend für die Bauteilqualität ist und selbst eine aufwendige Nachbearbeitung eine ungeschickte Wahl derer nur schwerlich ausgleichen kann.

Summary

Laser sintered parts are nowadays rarely used as visible parts because of the rather poor surface quality. In this work, areal surface texture parameters are applied to evaluate laser sintered part surface quality and the influences from several sections of the process chain. Exemplarily, objective values for identifying orange peel were found as well as process parameters to reduce its manifestation significantly. With haptic tests the subjective feeling was determined and the findings correlated with objective values. New insights of the partial particle melting on the part surface are shown with a microscopic look on the flat build angle by the use of two different colored powders. For the subsequent smoothing of part surfaces mechanical, chemical and optical post-processing methods were evaluated and their potential is demonstrated with experimental results. Finally, a novel simulation of the three-dimensional surface topography is used as a basis for a tool to automatically and functionally orientate the parts build position, which is successfully validated with the example of a real part. All in all the findings of this work show, that the right choice of build orientation and process parameters is crucial for the surface quality as even an extensive post-process is hardly a counterpoise a careless choice.

Liste der Vorveröffentlichungen

- [DHL+14] DELFS, P.; HERALE, A. A.; LI, Z.; SCHMID, H.-J.: Simulation of the Surface Topography on Laser Sintered Polymer Parts. Solid Freeform Fabrication Proceedings, 2014, p. 1250–1258
- [DLS15] DELFS, P.; LI, Z.; SCHMID, H.-J.: Mass Finishing of Laser Sintered Parts. Solid Freeform Fabrication Proceedings, Vol. 26, 2015, p. 514–526
- [DS16] DELFS, P.; SCHMID, H.-J.: Extended Analysis of the Surface Topography of Laser Sintered Polymer Parts. Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference (DDMC) Proceedings, Vol. 3, 2016
- [DS16b] DELFS, P.; SCHMID, H.-J.: Laser Sintered Part Surface Simulation of Topography and optimized Alignment (Vortrag), Nürnberg, 2016
- [DS17] DELFS, P.; SCHMID, H.-J.: Areal Surface Characterization of Laser Sintered Parts for various Process Parameters. Solid Freeform Fabrication Proceedings, Vol. 28, 2017, p. 2624–2631
- [DTS15] DELFS, P.; TÖWS, M.; SCHMID, H.-J.: Surface Roughness optimized Alignment of Parts for Additive Manufacturing Processes. Solid Freeform Fabrication Proceedings, Vol. 26, 2015, p. 1334–1344
- [DTS15b] DELFS, P.; TÖWS, M.; SCHMID, H.-J.: Surface Roughness optimized Alignment of Parts for Additive Manufacturing Processes (Vortrag), San Diego, 2015
- [DTS16] DELFS, P.; TÖWS, M.; SCHMID, H.-J.: Optimized build orientation of additive manufactured parts for improved surface quality and build time. Additive Manufacturing, Vol. 12, 2016, p. 314–320
- [JDL+16] JOSUPEIT, S.; DELFS, P.; LIENEKE, T.; ADAM, G.; SCHMID, H.-J.: Dimensional accuracy of polymer laser sintered parts: Influences and measures. In: Kniffka, W.; Eichmann, M.; Witt, G. (Ed.): Rapid.Tech - International Trade Show & Conference for Additive Manufacturing - Proceedings of the 13th Rapid.Tech Conference Erfurt, Germany, 14-16 June 2016, 2016, Hanser, München
- [JDL+16] JOSUPEIT, S.; DELFS, P.; LIENEKE, T.; SCHMID, H.-J.: Influences on the Dimensional Accuracy of Laser Sintered Parts along the Process Chain (Vortrag), Austin, 2016
- [JDM+16] JOSUPEIT, S.; DELFS, P.; MENGE, D.; SCHMID, H.-J.: Manufacturability and Mechanical Characterization of Laser Sintered lattice Structures. Solid Freeform Fabrication Proceedings, Vol. 27, 2016, p. 2077–2086
- [LAL+15] LIENEKE, T.; ADAM, G.; LEUDERS, S.; KNOOP, F.; JOSUPEIT, S.; DELFS, P.; FUNKE, N.; ZIMMER, D.: Entwicklung einer Methode zur systematischen Erarbeitung von Maßtoleranzen für additive Fertigungsverfahren. RapidTech Proceedings, 2015

- [LAL+15] LIENEKE, T.; ADAM, G.; LEUDERS, S.; KNOOP, F.; JOSUPEIT, S.; DELFS, P.; FUNKE, N.; ZIMMER, D.: Systematical determination of tolerances for additive manufacturing by measuring linear dimensions. Solid Freeform Fabrication Proceedings, Vol. 26, 2015, p. 371–384
- [MJD+17] MENGE, D.; JOSUPEIT, S.; DELFS, P.; SCHMID, H.-J.: Herstellbarkeit und mechanische Charakterisierung von lasergesinteren Gitterstrukturen. In: Richard, H. A.; Schramm, B.; Zipsner, T. (Ed.): Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen, 2017, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Prozesse und Grundlagen	3
2.1	Additive Fertigung mit Kunststoffpulver: Laser-Sintern	4
2.1.1	Datenverarbeitung	4
2.1.2	Pre-Prozess	7
2.1.3	Der Laser-Sinter Prozess	8
2.1.4	Post-Prozess	13
2.1.5	Nachbehandlung	15
2.2	Dreidimensionale Messung der Oberflächentopografie	15
2.3	Frühere Arbeiten dieses Themenbereichs	17
3	Verwendete Methoden und Prozesseigenschaften	19
3.1	Beschreibung von Probekörpern	19
3.2	Positionierung im Herstellungsprozess	24
3.2.1	Baujob Design Nr. 1	24
3.2.2	Baujob Design Nr. 2	27
3.2.3	Baujob Design Nr. 3	27
3.2.4	Prozessparameter	28
3.3	Aufbau zum reproduzierbaren Finish	30
3.4	Oberflächenglättung mittels Gleitschleifverfahren	32
3.5	Versuchsstand zur Ermittlung haptischer Eigenschaften	34
4	Verwendete Kennwerte	37
4.1	Rauheitskennwerte	37
4.2	Ermittlung von Oberflächenkennwerten	40
4.3	Analyse der Textureigenschaften mittels Grauwertematrix	40
5	Analyse der Oberflächeneigenschaften	43
5.1	Beschreibung haptischer Oberflächeneigenschaften	43
5.2	Einflüsse verschiedener Prozessparameter	47
5.2.1	Ausrichtung im Bauprozess	47
5.2.2	Position im Bauprozess	49
5.2.3	Schichtstärke im Bauprozess	52
5.2.4	Wandstärke eines Bauteils	53
5.2.5	Dauer einer Schicht	54
5.2.6	Abstand zweier Bauteiloberflächen	55
5.2.7	Altpulver im Bauprozess	57
5.3	Analyse der Partikelanhaftung	63
5.4	Glättung von Bauteiloberflächen	66
5.4.1	Gleitschleifen mittels Tellerfliehkraftverfahren	66

5.4.2	Behandlung mit Chemikalien	75
5.4.3	Nachträgliche Bestrahlung mit CO ₂ Laser	76
6	Analyse von Detailauflösungen	80
6.1	Schlitz- und Lochmaße	80
6.2	Spaltmaße	81
6.3	Schriften	83
7	Simulation der Oberflächeneigenschaften	86
7.1	Darstellung der dreidimensionalen Oberflächentopografie	86
7.2	Automatische Optimierung der Bauteilorientierung	91
8	Zusammenfassung und Ausblick	97