

Modellierung eines 3D-Druckers durch Einsatz der statistischen Versuchsplanung



Verbesserung der Oberflächenbeschaffenheit von 3D-Druckteilen

Daniel Frank, Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement am Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

Projektziel

Ziel des von Studenten der RWTH durchgeführten Projektes war es, für einen 3D-Drucker experimentell mathematische Modelle zur Prozessbeschreibung zu entwickeln und damit die Anwendbarkeit der statistischen Versuchsplanung zur Modellierung von 3D-Druckprozessen zu untersuchen. Experimentell untersucht wurden dabei solche Zielgrößen, die das Aussehen der gedruckten Teile beschreiben.

Lösung

Unter Einsatz von Minitab wurden Versuchspläne aufgesetzt und die Ergebnisse der Versuche ausgewertet. Mit Hilfe von qualitativen Voranalysen wurde zuvor eine Auswahl potenziell relevanter Faktoren getroffen.

Ergebnis

Mit Hilfe eines zweifaktoriellen, fraktionellen Versuchsplanes konnten weitgehend signifikante Modelle für die Zielgrößen Rauheit, Stärke der Oberflächenfehler und Zeit identifiziert werden. Mit Hilfe der Modelle konnten verbesserte Prozessparameter abgeleitet werden, welche im Anschluss weitgehend validiert werden konnten.

labor WZL der RWTH Aachen befasst sich in den Bereichen Lehre und Forschung sowie in der Unterstützung von Industrieunternehmen mit der statistischen Versuchsplanung (DoE). Ein am Lehrstuhl durchgeführtes Projekt befasste sich mit der Optimierung eines 3D-Druckers mit Hilfe des DoE-Verfahrens unter Einsatz der Software Minitab.

3D-Druck-Verfahren erlauben es, aus verschiedenen Produktkonzepten in der frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses in vergleichbar kurzer Zeit, gemessen an anderen Fertigungsverfahren, reale Objekte herzustellen. Diese Modelle können bei der Auswahl eines Konzeptes zur weiteren Entwicklung von großer Hilfe sein. Dazu müssen die 3D-gedruckten Prototypen möglichst deckungsgleich hinsichtlich Funktion, aber ebenso wahrnehmungsrelevanter Qualitätsparameter wie der Optik und Haptik mit einem konventionell produzierten Bauteil sein.

Ziel des Projektes war es, für einen 3D-Drucker, welcher das sogenannte Fused-Deposition-Modeling-Verfahren anwendet, experimentelle mathematische Beschreibungsmodelle für insgesamt fünf Zielgrößen zu bilden. Dabei wurden vier Zielgrößen gewählt, die in Zusammenhang mit der optischen Beschaffenheit der gedruckten Teile stehen: Die Oberflächenrauheit, gemessen an drei verschiedenen Stellen des gedruckten Objektes, sowie eine subjektive, „Ausbrüche“ genannte Zielgröße, welche die Häufigkeit und das Ausmaß von Materialausbrüchen aus der Objektoberfläche beschreibt (s. Abbildung 1).

Projektziel

Der Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement am Werkzeugmaschinen-

Als fünfte Zielgröße wurde die Druckzeit bei den Versuchen gemessen. Die Generierung von Modellen sollte einerseits dazu dienen, den Druckprozess besser zu verstehen. Andererseits sollten mithilfe der entwickelten Modelle Prozessparameter abgeleitet werden, welche zu einer möglichst geringen Ausprägung der fünf betrachteten Zielgrößen führen. Um alle Zielgrößen messbar zu machen, wurde ein Beispielobjekt entworfen, welches die drei unterschiedlichen untersuchten Oberflächenrichtungen beinhaltet (s. Abbildung 1).

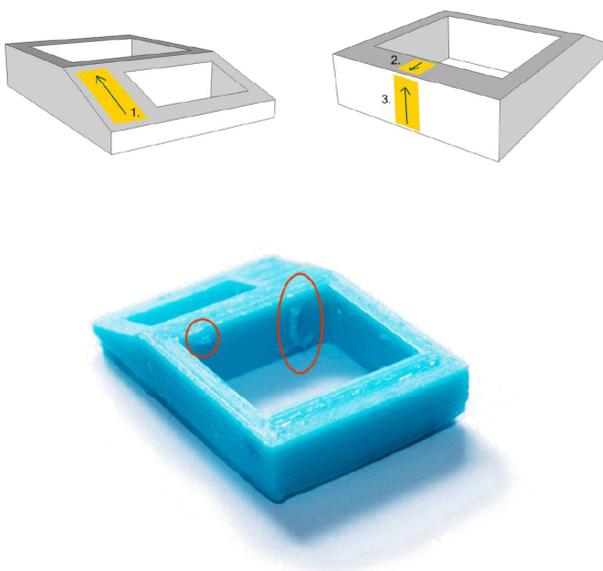


Abbildung 1: Oben: Messstellen, an denen die Rauheit des Objektes gemessen wurde. Unten: Ausbrüche an einem mittels FDM-Verfahren gedruckten Bauteil

Lösung

Bei der Lösung war es zunächst notwendig, eine qualitative Auswahl der Prozessparameter vorzunehmen, da in der Software des 3D-Druckers über 20 unterschiedliche Prozessparameter einstellbar sind – zu viele für eine experimentelle Untersuchung. Aus Vorversuchen konnten einige Parameter als fix deklariert werden, da entweder, wie z. B. im Fall der Temperatur am Extruder, bereits ein Wert bekannt war, der eingestellt werden sollte, damit der Prozess reibungslos abläuft, oder weil der Einfluss weitgehend bekannt war, z. B. im Falle der relativen

Düsengeschwindigkeit des Extruders. Fünf Faktoren verblieben schließlich, die als wesentlich eingestuft wurden: Die Schichtdicke, die Druckgeschwindigkeit für die äußeren (sichtbaren) Flächen des Objektes, die Druckgeschwindigkeit für die oberste Schicht des Objektes, die Extrudierbreite für die äußere Schicht sowie die Extrudierbreite für die obersten Schichten des Objektes. Für die fünf Zielgrößen wurde ein zweistufiger Versuchsplan mit Auflösung V und einer Versuchswiederholung gewählt. Der Versuchsplan umfasste damit 16 Versuche. Die Ergebnisse der einzelnen Versuche wurden im Versuchsplan notiert. Dabei wurde die Druckzeit per Hand gemessen, die Schwere der Ausbrüche anhand einer vorher festgelegten Skala von 1 (kaum bzw. wenige kleinere Ausbrüche) bis 5 (viele bzw. mehrere größere Ausbrüche) bestimmt und die Rauheit auf drei festgelegten Flächen mit Hilfe eines technischen Rauheitsmessgerätes bestimmt.

Ergebnis

Für jede der fünf Zielgrößen wurde mit Hilfe der Software eine separate Modellfunktion auf Basis der Versuchsergebnisse durch *Varianzanalyse* (ANOVA) mit Hilfe von Minitab bestimmt. Dabei wurden nicht signifikante Faktoren nach und nach aus dem Modell entfernt, wobei ein Signifikanzniveau von 5% angesetzt wurde. So ergaben sich etwa für die Zielgröße Druckzeit ein aus fünf Haupteffekten und fünf Wechselwirkungen bestehendes Modell mit einem Bestimmtheitsmaß (Korreliert) von 99,99% (Residuen unauffällig). Nachfolgend werden die sich aus der ANOVA ergebenden Signifikanzniveaus der im Modell verbleibenden Faktoren für die Zielgröße Druckzeit aufgelistet:

Faktorielle Regression: Druckzeit vs. Layer Height; External per; ...

Quelle	p-Wert
Modell	0,000
Linear	0,000
Layer Height	0,000
External perimeters (speed)	0,000
Top solid infill (speed)	0,927
External perimeters	0,000
Top solid infill	0,127
2-Faktor-Wechselwirkungen	0,000
Layer Height*External perimeters (speed)	0,000
Layer Height*External perimeters	0,000

```

Layer Height*Top solid infill          0,031
External perimeters (speed)*External perimeters 0,000
Top solid infill (speed)*Top solid infill 0,001
Fehler
Gesamt
    
```

Zusammenfassung des Modells

S	R-Qd	R-Qd(kor)	R-Qd(prog)
2,60048	100,00%	99,99%	99,98%

Die Bestimmtheitsmaße der Modellfunktionen beträgt für vier der fünf Zielgrößen mindestens 86%. Lediglich bei der Zielgröße „Ausbrüche“ ist nur ein Bestimmtheitsmaß von knapp 50% festzustellen. Zur Beschreibung dieser Zielgröße müssten folglich weitere Faktoren experimentell analysiert werden.

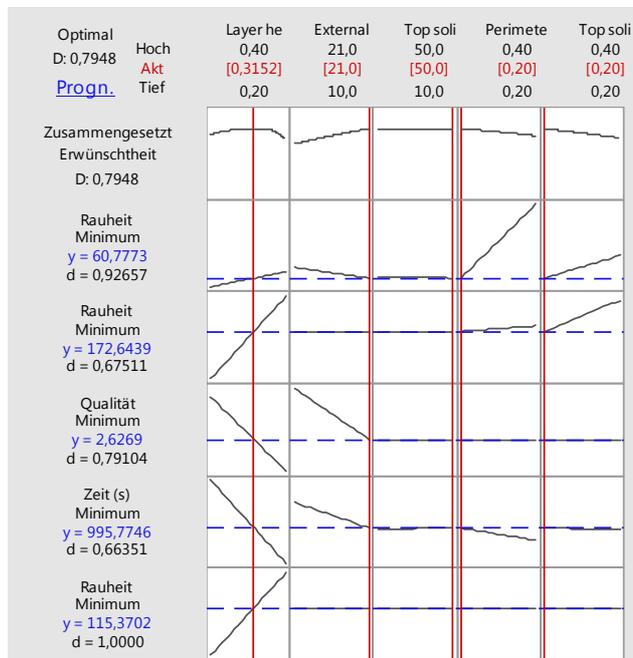


Abbildung 2: Ergebnis des Response Optimizers (Zielgrößenoptimierung)

Mit Hilfe der Modellfunktionen wurde die Funktion Response Optimizer (Zielgrößenoptimierung) in Minitab eingesetzt (s. Abbildung 2), wobei die Reihenfolge der Wichtigkeit der fünf Zielgrößen durch die Methode des paarweisen Vergleichs bestimmt wurde. Auf Grundlage des optimierten Parametersatzes wurden fünf weitere Testobjekte gedruckt, um die Modellprognosen mit der Wirklichkeit zu vergleichen. Die Abweichungen hielten sich dabei für vier der fünf Zielgrößen unter 10%, lediglich für eine der gemessenen Rauheiten ergab sich eine Abweichung von

knapp 37%, weshalb eine detaillierte experimentelle Analyse im betrachteten Versuchsraum sein könnte. Der optimierte Parametersatz wurde hinsichtlich der fünf Zielgrößen mit der mittleren Ausprägung dieser Zielgrößen in der Versuchsreihe verglichen. Dabei lässt sich feststellen, dass die Ausprägung in allen fünf Zielgrößen niedriger ist als im Mittel der Versuchsreihe. Bis zu 38% beträgt die Verbesserung der Zielgrößen konkret. Abschließend lässt sich feststellen, dass sich trotz eines sehr simplen Versuchsplans mit nur wenigen Versuchen eine verhältnismäßig gute Beschreibung des Prozessverhaltens im Versuchsraum erzeugen ließ. Die Auswertung des Versuchsplans ist in kürzester Zeit vollzogen, insbesondere die in Minitab 17 eingeführte automatische schrittweise Reduktion des Modells macht die Software sehr effizient. Durch zehn weitere Versuche lässt sich der zweistufige, faktorielle Versuchsplan in Minitab mit wenigen Klicks zu einem Wirkungsflächenversuchsplan „aufrollen“. Durch intuitive Bedienung und anschauliche Grafiken fördert Minitab insgesamt den effektiven Einsatz aller Software-Funktionalitäten.



ADDITIVE Soft- und Hardware s
für Technik und Wissenschaft GmbH

Max-Planck-Str. 22 b
D-61381 Friedrichsdorf/Ts.

Telefon: +49 (0)61 72-59 05-0
Fax: +49 (0)61 72-77 613
E-Mail: info@additive-net.de
Internet: <http://www.additive-net.de/software>

Die ADDITIVE GmbH ist ein Systemhaus, das Produkte und Dienstleistungen für technische, wissenschaftliche Anwendungen bietet. Mit hochqualifizierten Mitarbeitern aus unterschiedlichen Ingenieurdisziplinen, aufgeteilt in drei Geschäftsbereiche - SOFTWARE, IT-SERVICE und ACADEMY -, schaffen wir mit Ihnen zusammen einen Mehrwert für Ihre Anwendungen.

ADDITIVE wurde 1989 gegründet und hat seinen Firmensitz in Friedrichsdorf am Rande des Taunus. Durch die Nähe zu Frankfurt am Main sind wir in Deutschland wie auch international schnell bei Ihren Anwendungen vor Ort.

Die Kernkompetenzen von ADDITIVE liegen im Bereich der Datenerfassung/-analyse und Datenvisualisierung, Software für Mathematik und Statistik, Software für das statistische Qualitätsmanagement sowie Software für Chemie und Life Science und webbasierten Anwendungen.

ADDITIVE vermarktet Standardprodukte technisch führender Hersteller und ergänzt diese mit umfangreichen Ingenieurdienstleistungen. Diese reichen von der Beratung und dem Verkauf inklusive Pre- und After-Sales-Service bis hin zu kunden- und anwendungsspezifischen Erweiterungen, Systemintegration, Inbetriebnahme, Schulungen u.v.m.

ADDITIVE-Kunden finden sich in allen Branchen wieder, wie z. B. Finance, Automotive, Aerospace, Engineering, Pharma und IT-Services, der kompletten deutschen Forschungslandschaft und allen akademischen Institutionen.

Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement, Abteilung Produktmanagement
Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

Steinbachstraße 19
52074 Aachen

E-Mail: frk@wzl.rwth-aachen.de
Internet: <http://www.wzl.rwth-aachen.de>

Das Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen steht seit Jahrzehnten weltweit als Synonym für erfolgreiche und zukunftsweisende Forschung und Innovation auf dem Gebiet der Produktionstechnik. In sechs Forschungsbereichen werden sowohl grundlagenbezogene als auch an den Erfordernissen der Industrie ausgerichtete Forschungsvorhaben durchgeführt. Darüber hinaus werden praxisgerechte Lösungen zur Rationalisierung der Produktion erarbeitet. Das Werkzeugmaschinenlabor wird von den vier Professoren Christian Brecher, Fritz Klocke, Robert Schmitt und Günther Schuh geführt.

Die Abteilung Produktmanagement am Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement des WZL befasst sich in Forschung, Lehre und industriellen Projekten mit Fragestellungen im Kontext der Produkteffektivität – der Maximierung des Produktwertes – und der Prozesseffizienz – der kostenoptimalen Umsetzung von Kundenforderungen. Hierzu werden durch die Abteilung z. B. Studien zur wahrgenommenen Qualität von Produkten sowie Prozessaudits und -benchmarks durchgeführt und neue Methoden und Strategien im Bereich der Prüfplanung, der Produktwertanalyse und der Prozessoptimierung entwickelt.