

1 Einleitung

Introduction

„The best is yet to come“, war sich Physik-Nobelpreisträger Gérard Mourou sicher, was er bei der Verleihung der Ehrendoktorwürde an der Heinrich-Heinrich-Universität in Düsseldorf am 13. Juni 2019 für die Lasertechnik erläuterte [KURL19]. Den Nobelpreis erhielt er Ende 2018 im Bereich der ultrakurzgepulsten Laser. Trotz der seit 1960 andauernden Forschung im Bereich der Lasertechnik lässt diese Aussage für die Zukunft noch einige spannende Innovationen erwarten.

Besondere Struktureindrücke und Designfeatures an Kunststoffteilen haben eine zunehmende Bedeutung für verschiedenste Produkte, um deren Oberflächen für den Betrachter möglichst ansprechend zu gestalten. Daher werden Oberflächenverfahren eingesetzt, mit denen dem Kunststoffteil ein ansprechendes Design und häufig auch eine angenehme Haptik verliehen wird. Dabei werden neben Strukturen auch Firmenlogos oder diverse andere Informationen in das Muster eingebracht, um den Wiedererkennungswert zu steigern.

Gerade im Automobil eingesetzte Oberflächen befinden sich im Spannungsfeld zwischen Kundenwunsch und Preissegment. Die Optik und Haptik der Verkleidungen sollen edel anmuten, dürfen im Rahmen der Herstellung bestimmte Preisvorgaben aber nicht überschreiten. Statt eines kostspieligen Echtleders werden als Alternative daher häufig synthetische Formhäute verwendet. Zur Fertigung solcher Formhäute werden Werkzeuge zum Abformen strukturiert, sodass das abgeformte Bauteil die gewünschte Designoberfläche aufweist [LAKE09, S. 377]. Dies kann eine Lederoptik sein, welche vom Kunden subjektiv ebenfalls als hochwertig empfunden wird. Bei der Strukturauslegung kann neben der Optik auch die Haptik berücksichtigt werden, um diese möglichst angenehm zu gestalten. [EICH04, S. 26] [FRAU08, S. 9] [KORD07, S. 5]

Oberflächenstrukturen werden allerdings nicht nur in Werkzeuge zur replikativen Fertigung eingebracht; funktionalisierte Oberflächen können ebenso entscheidend für den Nutzen und die Effizienz eines Werkstücks sein [BONS14, S. 103] [DENK08, S. 21]. Kleinst- te Mikrostrukturen mit höchster Genauigkeit zur Lichtemission [TANG11, S. 431], präzise positionierte komplexe 3D-Strukturen für die Entlüftung von Spritzgießformen [BOBZ11, S. 415], technische Strukturen auf bewegten Komponenten zur Änderung von tribologischen Eigenschaften [JANS12, S. 36] [BONS14, S. 103], geometrisch komplexe Kapillarsysteme für mikrofluide Anwendungen [COMA14, S. 206] oder Nanostrukturen für optische oder technische Effekte [LI11, S. 735] benötigen ein Herstellungsverfahren, das eine detaillierte und präzise Fertigung von Mikrostrukturen auf Oberflächen ermöglicht. Auch

metallische Implantate in der Medizin können mit einer tribologischen Struktur versehen werden. Wenn ein festes Verwachsen des Implantats mit dem Körpergewebe erwünscht ist, werden hohe Rauheiten angestrebt ($R_z > 100 \mu\text{m}$). All diese Strukturen können direkt mit dem Laser in das Bauteil eingebracht werden. [STÖV09, S. 769]

Der Einsatz von Lasern u. a. zur Bearbeitung von Werkstücken steigt kontinuierlich an, wie der weltweite Umsatz mit Lasern zeigt (Abbildung 1.1). Der Laser als Werkzeug vereint dabei verschiedene Vorteile in sich, die bei konventionellen Oberflächenverfahren in der Gesamtheit nicht zu finden sind. Dazu gehören die Präzision, die zeitlich und lokal definierbare Beeinflussung der Oberfläche, die kraft- und berührungslose Bearbeitung und die Automatisierbarkeit bei weitgehender Werkstoffunabhängigkeit. Laseroberflächenstrukturierung hat das Potenzial, die prozesstechnologischen Anforderungen an Mikrostrukturen zu erfüllen und erlaubt es außerdem, neben freigeformten Teileflächen auch große Areale mit hoher Reproduzierbarkeit zu fertigen. [KLOC10, S. 1] [GROE14, S. 30]

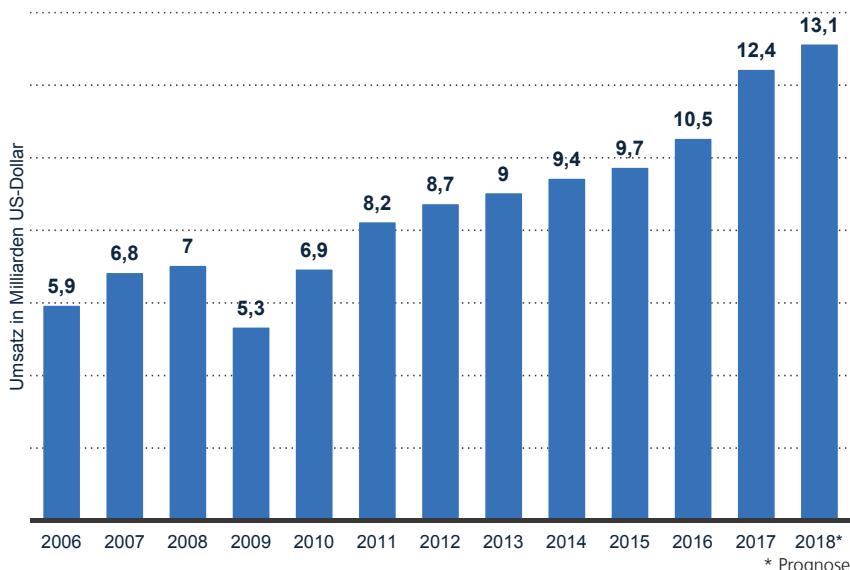


Abbildung 1.1: Umsatz mit Lasern weltweit in den Jahren 2006 bis 2018 [LASE18]

Turnover With Lasers Worldwide in the Years 2006 to 2018

Die Laseroberflächenstrukturierung ist ein hochkomplexes Verfahren mit einer Vielzahl an einstellbaren Parametern. Diese Parameter beeinflussen sowohl die erzeugte Geometrie, die erreichbare Genauigkeit als auch die Abtragrate. Die Parameter müssen derart gewählt werden, dass nach dem Prozess das Bauteil die ge-

wünschte Struktur mit der vorgesehenen Tiefe aufweist. Das Abtragergebnis ist darüber hinaus abhängig vom zu bearbeitenden Werkstoff, da der Laserstrahl je nach Werkstoff unterschiedlich absorbiert wird. Es kann daher keine allgemeingültige Vorhersage bzgl. des Abtragergebnisses getroffen werden. Vor dem Prozess werden daher kosten- und zeitintensive Parameterstudien durchgeführt, um möglichst die geeignete Parameterkombination für die Bearbeitung auswählen zu können.

Am Markt existieren einige Maschinenlösungen zur Laserstrahlstrukturierung, die in bestimmten Branchen schon verbreitet angewendet werden. Allerdings ist der Strukturierprozess in diesen Maschinen meist ein nicht kontrollierter oder nicht geregelter Prozess, sodass eine Qualitätskontrolle erst nach dem teilweise mehrere Stunden oder sogar Tage dauernden Laserprozess möglich ist. Bei fehlerhaften Parametern bzw. Einstellungen können so hohe Kosten entstehen, da eine Nachbearbeitung des Werkstücks oftmals nicht möglich ist.

Ziel dieser Arbeit ist die Substitution der Parameterstudien bei gleichzeitiger Erhöhung der Fertigungsqualität durch eine CAM-basierte Lösung zur Prozessregelung. Dazu wird eine Regelung den Prozess derart beeinflussen, dass ohne eine langwierige Parameterstudie am Ende des Prozesses die programmierte Struktur unabhängig vom zu bearbeitenden Werkstoff in das Bauteil eingebracht werden kann. Ein maschinenintegriertes Messgerät zur Tiefenkontrolle wird in den Laserkopf und in die CAx-Prozesskette integriert, welches eine regelmäßige Kontrolle des Abtrags ermöglicht. Dies erlaubt eine automatisierte und geregelte Laserstrahlstrukturierung zur Sicherung der gewünschten Abtragtiefe. Mit einem solchen selbstoptimierenden Prozess leistet diese Arbeit damit einen Beitrag zum Themengebiet der vernetzten, adaptiven Produktion.

Die Arbeit beginnt mit einem Überblick über den Stand der Technik in Kapitel 2. Die Zielsetzung, Aufgabenstellung und Vorgehensweise werden in Kapitel 3 beschrieben. In den nun folgenden drei Hauptkapiteln werden zuerst in Kapitel 4 die Prozesseinflussgrößen analysiert und diejenigen Parameter identifiziert, die den Abtrag beeinflussen und für eine effiziente Regelung genutzt werden können. Anschließend werden in Kapitel 5 Systemparameter des Strahlführungssystems optimiert, um einen stabilen Prozess für die nachfolgende Prozessregelung realisieren zu können. Die Implementierung der Prozessregelung und die Integration dieser in die CAx-Prozesskette wird in Kapitel 6 durchgeführt. Vor der Zusammenfassung und dem Ausblick findet eine Validierung des Gesamtsystems in Kapitel 7 statt.