# Verfahrens- und werkstoffspezifische Einflussfaktoren beim Laserpolieren additiv gefertigter Kunststoffbauteile

Process and Material Specific Factors in Laser Polishing of Additive Manufactured Plastic Parts

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades einer Doktorin der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Andrea Lanfermann

Berichter: Apl. Prof. Dr.-Ing. Arnold Gillner
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann

Tag der mündlichen Prüfung: 15. April 2024

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

# Zusammenfassung

Die Herstellung verschiedenster Bauteile aus Kunststoff ist weit verbreitet und die Nachfrage steigt kontinuierlich. In vielen Branchen sind Kunststoffbauteile vermeintlich unersetzlich. – Doch haben viele eines gemeinsam: Die Oberfläche muss funktionale Zwecke erfüllen. Während die Oberfläche bei optischen Linsen glatt sein muss, muss das Armaturenbrett visuellen Gestaltungsansprüchen genügen und beispielsweise eine bestimmte Struktur aufweisen. Besonders in der 3D-Druck Technik weisen die Bauteiloberflächen eine hohe Rauheit auf und benötigen oftmals eine Glättung der Oberfläche für die vorgesehenen Anwendungen. Viele Verfahren zur Reduktion der Oberflächenrauheit sind aufwendig, kostenintensiv oder erfüllen nicht alle geforderten Qualitäts-anforderungen. Eine Alternative zu den herkömmlichen Methoden ist das Laserpolieren. Das Laserpolieren wird bereits bei Metallen und Gläsern erfolgreich eingesetzt. Das Verfahren für Kunststoffe ist noch nicht so weit ausgereift, obwohl gerade hier viel Potential liegt. Zur Verbesserung des Prozessverständnisses werden im Rahmen dieser Arbeit umfassende Studien durchgeführt, mit deren Ergebnisse die wesentlichen Kernparameter und Randbedingungen des Prozesses herausgearbeitet werden können.

Insbesondere wird im Rahmen dieser Dissertation der systematische Einfluss der verschiedenen Prozessparameter sowie der Zusammenhang zwischen Temperaturgradient, Viskosität, Oberflächenspannung und der Rauheits-reduktion beim Laserpolieren untersucht. Durch eine Varianzanalyse wird gezeigt, dass insgesamt die Temperatur den größten Einfluss auf den Laserpolierprozess aufweist. Direkt darauffolgend sind die Scangeschwindigkeit an zweiter Stelle und der Laserstrahldurchmesser an dritter Stelle. Alle als signifikant geltenden Prozessparameter haben gemein, dass sie einen großen Effekt auf die Ausbildung des Schmelzbads haben und somit auf die Fließfähigkeit der Kunststoffschmelze. Aus diesem Grund ergibt sich die Hypothese, dass die Rauheitsreduktion eine systematische Abhängigkeit von der Viskosität des Materials aufweist. Diese Hypothese kann im Rahmen der Arbeit bestätigt werden. Für Viskositäten bis zu $\eta^* = 500$ Pa*s nimmt die Rauheitsreduktion mit steigender Viskosität exponentiell zu. Oberhalb dieses Grenzwerts dagegen nimmt sie nahezu linear ab. Die lineare Abnahme der Rauhigkeitsreduktion ab diesem Grenzwert lässt darauf schließen, dass ab diesem Punkt die Oberflächenspannung zunehmend zu klein ist, um die Viskosität zu überwinden und die Oberfläche zu glätten. Dies führt dazu, dass ein Temperaturbereich existiert, in dem sich beide Kräfte gut ergänzen zur Rauhigkeitsreduktion

# Abstract

Components made of plastic are produced all over the world and the demand for them is continuously increasing. Indeed, plastic components in the most varied forms and sizes have become indispensable in many industries; what most components share, however, is the need for a functional surface. For example, optical lenses must have smooth surfaces to operate effectively, while automobile dashboards need rough ones to meet visual design requirements. Many conventional methods for producing a defined surface roughness are complex, costly or do not meet all the required quality standards. An alternative to them is laser polishing, which is already used for metals and glass with great success. Nonetheless, the process is not yet fully developed for plastics, and this is precisely where a lot of potential lies. In particular, the surfaces of 3D-printed plastic components are rough and often require surface smoothing for the intended applications. More comprehensive studies need to be conducted to work out the essential core parameters in order to better understand the laser polishing process.

This dissertation presents investigations on the systematic relations between various process parameters as well as the correlation between temperature gradient, viscosity, surface tension and roughness reduction during laser polishing. A variance analysis showed that the temperature has the greatest influence on the laser polishing process. This is immediately followed by the scanning velocity and then the laser beam diameter. All process parameters considered significant have a large effect on the formation of the melt pool and, thus, on the flowability of the plastic melt. This leads to the hypothesis that the roughness reduction is systemically dependent on the viscosity of the material. This hypothesis was confirmed in the experiments presented here. For viscosities below $\eta^* = 500$ Pa*s, roughness reduction increased exponentially with increasing viscosity, whereas above this limit it decreased almost linearly. The exponential increase below this limit suggests that at this point the relation between surface tension and viscosity is not suitable for smoothing the surface. This leads to the existence of an optimal temperature range where both forces fit together perfectly.

# Inhalt


| | | |
|---|---|---|
| **1** | **Einleitung** | **1** |
| **2** | **Zielsetzung und Vorgehensweise** | **2** |
| **3** | **Stand der Technik** | **3** |
| 3.1 | Additive Fertigung in der Industrie | 3 |
| 3.1.1 | Thermisches Verhalten von Thermoplasten | 5 |
| 3.1.2 | Rheologie von Kunststoffen | 8 |
| 3.1.3 | Additive Fertigung mit Polymeren | 9 |
| 3.1.4 | Polieren von Kunststoffen | 11 |
| 3.2 | Laserpolieren | 11 |
| 3.2.1 | Grundlagen des Laserpolierens | 12 |
| 3.2.2 | Bisherige Untersuchungen zum Laserpolieren von Kunststoffen | 16 |
| 3.3 | Oberflächenrauheit | 19 |
| 3.3.1 | Definition und Kenngrößen | 19 |
| 3.3.2 | Weißlichtinterferometrie | 21 |
| 3.4 | Statistische Versuchsplanung | 22 |
| 3.5 | PID-Regler | 25 |
| **4** | **Experimentelle Grundlagen** | **27** |
| 4.1 | Probenmaterial Polyamid | 27 |
| 4.1.1 | Vergleich mit anderen Kunststoffen | 28 |
| 4.1.2 | Additiv gefertigte Proben | 29 |
| 4.1.3 | Emissionsgrad des Probenmaterials | 30 |
| 4.2 | Verwendetes Laser-Setup | 31 |
| 4.2.1 | Laserstrahlquelle | 31 |
| 4.2.2 | Versuchsaufbau | 31 |
| 4.2.3 | Temperaturregelung | 33 |
| **5** | **Aufstellung der Forschungshypothese** | **36** |
| **6** | **Experimentelle Untersuchungen** | **44** |
| 6.1 | Eingrenzung des Parameterraums zur Durchführung experimenteller Versuchsreihen | 44 |
| 6.1.1 | Ausgangssituation und Untersuchungsziel | 44 |
| 6.1.2 | Festlegung der Basisparameter | 44 |
| 6.1.3 | Festlegung des Versuchsplans | 46 |
| 6.1.4 | Ergebnisse | 47 |
| 6.1.5 | Fazit | 51 |

6.2 Bestimmung des Einflusses verschiedener Prozessparameter auf die Rauheitsreduktion beim Laserpolieren 52
6.2.1 Untersuchungsziel 52
6.2.2 Festlegung des Versuchsplans 52
6.2.3 Ergebnisse 53
6.2.4 Fazit 80
6.3 Einfluss der Viskosität auf das Laserpolieren 83
6.3.1 Probenmaterial zur Untersuchung des Einflusses der Viskosität 83
6.3.2 Bestimmung des Schmelztemperaturbereichs verschiedener Kunststoffe 84
6.3.3 Bestimmung der Viskosität 87
6.3.4 Einfluss der Viskosität auf die Rauheitsreduktion beim Laserpolieren 91
6.3.5 Fazit 102

**7 Simulation zur Analyse des Temperatur- und Viskositätsgradienten 104**

**8 Schlussfolgerung 111**

**9 Ausblick 114**

**10 Literaturverzeichnis 116**

**11 Symbol- und Abkürzungsverzeichnis 119**

**12 Anhang 120**
12.1 Orthogonaler L50-Versuchsplan nach Taguchi 120
12.2 Modellbildung zur Analyse des Temperaturgradienten 122
12.2.1 Parameter zur Modellberechnung 122
12.2.2 Ergänzende Ergebnisse der Modellbildung 122

**Danksagung 125**

# 1 Einleitung

Die Herstellung verschiedenster Bauteile aus Kunststoff ist weit verbreitet und die Nachfrage steigt kontinuierlich. Während Optikelemente früher hauptsächlich aus Glas gefertigt wurden, existieren heute beispielsweise schon Intraokularlinsen aus Kunststoff. In der Automobilindustrie werden sowohl funktionale Bauteile wie z.B. Zahnräder, als auch Designelemente, wie Komponenten des Armaturenbretts, aus Kunststoff gefertigt. Auch in vielen anderen Branchen sind Kunststoffbauteile nicht mehr wegzudenken. – Doch haben sie alle eines gemeinsam: Die Oberfläche muss funktionale Zwecke erfüllen. Während die Oberfläche bei optischen Linsen glatt sein muss, muss das Armaturenbrett visuellen Gestaltungsansprüchen genügen und beispielsweise eine bestimmte Rauheit aufweisen. Zunehmende Bedeutung gewinnt der Einsatz gezielter Rauheit bei Materialien, die im Körper eingesetzt werden. Diese müssen je nach Einsatz bestimmte Rauheitswerte aufweisen. Die Herstellungsverfahren für Kunststoffbauteile lassen eine so große spezifische Vielfalt nicht zu, sodass eine Nachbearbeitung der Oberfläche notwendig ist.

Besonders in der 3D-Druck Branche weisen die Bauteiloberflächen eine hohe Rauheit auf und benötigen oftmals eine Glättung der Oberfläche für die vorgesehenen Anwendungen. Viele Verfahren zur Reduktion der Oberflächenrauheit sind aufwendig, kostenintensiv oder erfüllen nicht alle geforderten Qualitätsanforderungen. So wird z.B. beim Gleitschleifen eine glatte Oberfläche erreicht, aber die Kanten des Bauteils werden abgerundet und die Bauteilabmessung wird nicht beibehalten. Außerdem kann die Oberfläche nur großflächig geschliffen werden und nicht selektiv. Verfahren, wie das chemische Ätzen, sind zum einen kostenintensiv und zum anderen fällt Chemikalienabfall an, der gesundheitsgefährdend ist und aufwendig entsorgt werden muss. Eine Alternative zu den herkömmlichen Methoden ist das Laserpolieren. [1]

Das Laserpolieren wird bereits bei Metallen eingesetzt, und auch Gläser werden schon mit großem Erfolg laserpoliert. Allerdings ist das Verfahren für Kunststoffe noch nicht ausgereift, obwohl gerade hier viel Potential liegt. Für gängige Kunststoffe wurde das Verfahren in wenigen Studien mit stark streuenden Ergebnissen getestet. Aus diesem Grund muss das Prozessverständnis zum Laserpolieren verbessert werden, indem umfassende Studien durchgeführt werden, mit denen die wesentlichen Kernparameter des Prozesses herausgearbeitet werden können. Die vorliegende Dissertation zielt darauf, das Prozessverständnis durch experimentelle Untersuchungen zum Laserpolieren von Kunststoffen zu verbessern.

# 2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung, ob die Voraussetzungen zum Laserpolieren, die für das Glas- und Metallpolieren etabliert sind, auch für Kunststoffe anwendbar sind. Hierzu wird eine Ermittlung der Einflussfaktoren zur Reduktion von Rauheit mittels Laserpolieren von additiv gefertigten Kunststoffen durchgeführt.

In diesem Rahmen sollen zwei zentrale Forschungsfragen beantwortet werden. Zum einen soll die Frage beantwortet werden, welche Prozessparameter den größten Einfluss auf die Polierfähigkeit beim Laserpolieren von additiv gefertigten Kunststoffen haben. Untersucht werden hierbei die zur Regulierung der Laserleistung eingestellte Zieltemperatur, die Scangeschwindigkeit, der Laserstrahldurchmesser, die Spurüberlagerung, die Anzahl Überfahrten, die Trocknung von Proben und die Zeit zwischen Überfahrten. Zum anderen soll qualitativ beantwortet werden, welche Randbedingungen bei der Kombination von Prozess- und Werkstoffeigenschaften, insbesondere der Viskosität, für eine hohe Rauheitsreduktion zu beachten sind. Die Beantwortung dieser Fragen soll das Prozessverständnis qualitativ verbessern, sodass die Erkenntnisse dieser Dissertation zu einer Prozessoptimierung beitragen können.

Als Material wird Polyamid 12 (PA12) verwendet, da es beim selektivem Lasersintern (SLS) das am meisten verwendete Material ist. Das Prozessverständnis soll durch die Untersuchungen verbessert werden, indem der systematische Einfluss der verschiedenen Prozessparameter betrachtet wird. Methodisch wird die statistischen Versuchsplanung angewendet. Hierzu werden verschiedene Versuchsreihen erstellt und die Oberflächenrauheit inklusive der Streuung ermittelt. Mit Hilfe der Versuchspläne und statistischen Analysemethoden kann der Einfluss der einzelnen Parameter berechnet werden.

Im zweiten Schritt wird die komplexe Viskosität der Kunststoffe herangezogen und mit der Rauheitsreduktion beim Laserpolieren verschiedener Kunststoffe in Zusammenhang gebracht. Hierbei werden die Kunststoffe, die laut Literatur zum Laserpolieren getestet wurden, erstmals unter gleichen Voraussetzungen und mit einem identischen Lasersetup miteinander verglichen. Für die Untersuchung werden PA12, PA6, PP, PLA und ABS betrachtet, um den Zusammenhang zwischen den verschiedenen prozess- und stoffspezifischen Faktoren beim Laserpolieren herzustellen.

# 3 Stand der Technik

## 3.1 Additive Fertigung in der Industrie

Die additive Fertigung ist ein Herstellungsverfahren, das durch den schichtweisen Aufbau und der gezielten Zugabe von Material charakterisiert ist. Durch einen digitalen Plan des Bauteils am Computer erstellen die Maschinen Schicht für Schicht das Bauteil, sodass auch komplexe 3D Geometrien einfach hergestellt werden können. Die additive Fertigung wird vorwiegend zur Erstellung von Prototypen oder Kleinserien verwendet, da sie keine vorgefertigten Formen, wie beispielsweise beim Spritzguss, benötigt. Mit der additiven Fertigung können verschiedene Materialien, wie beispielsweise Metall, Keramiken oder Kunststoffe, verarbeitet werden. [1]

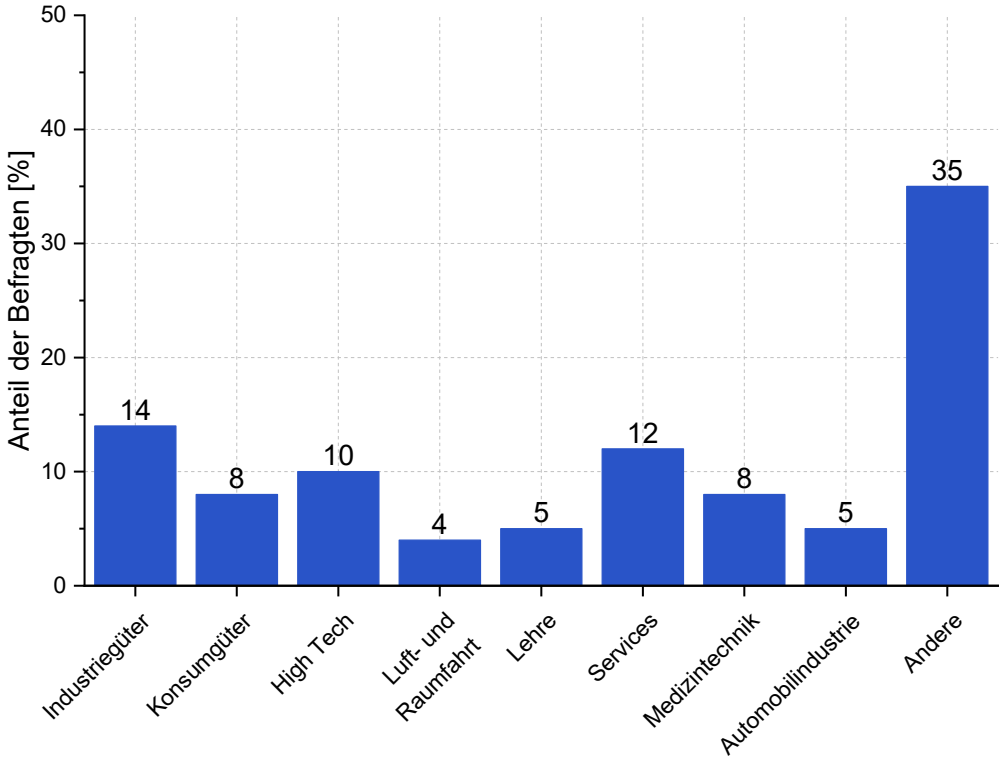



**Bild 1** Branchen, in denen 3D-Druck angewendet wird im Jahr 2020 – Weltweite Sculpteo Befragung von über 1.600 Teilnehmern aus 71 Ländern [2]

Die Firma Sculpteo führt regelmäßige Umfragen zur Anwendung des 3D-Drucks in der Industrie durch, wie z.B. im Jahr 2020 [2]. In den Bildern 1-3 sind einige Ergebnisse dargestellt. Übliche Branchen, in denen additive Fertigung eingesetzt wird, sind in Bild 1 dargestellt. Die Anteile der benannten Branchen sind hierbei gleichmäßig auf verschiedene Bereiche, wie beispielsweise Industriegüter,

Services oder Automobilindustrie, verteilt. Der Anteil von 35 % an anderen Branchen zeigt, dass die Reichweite des 3D Drucks weit umfangreicher ist, als durch diese Umfrage erfasst.

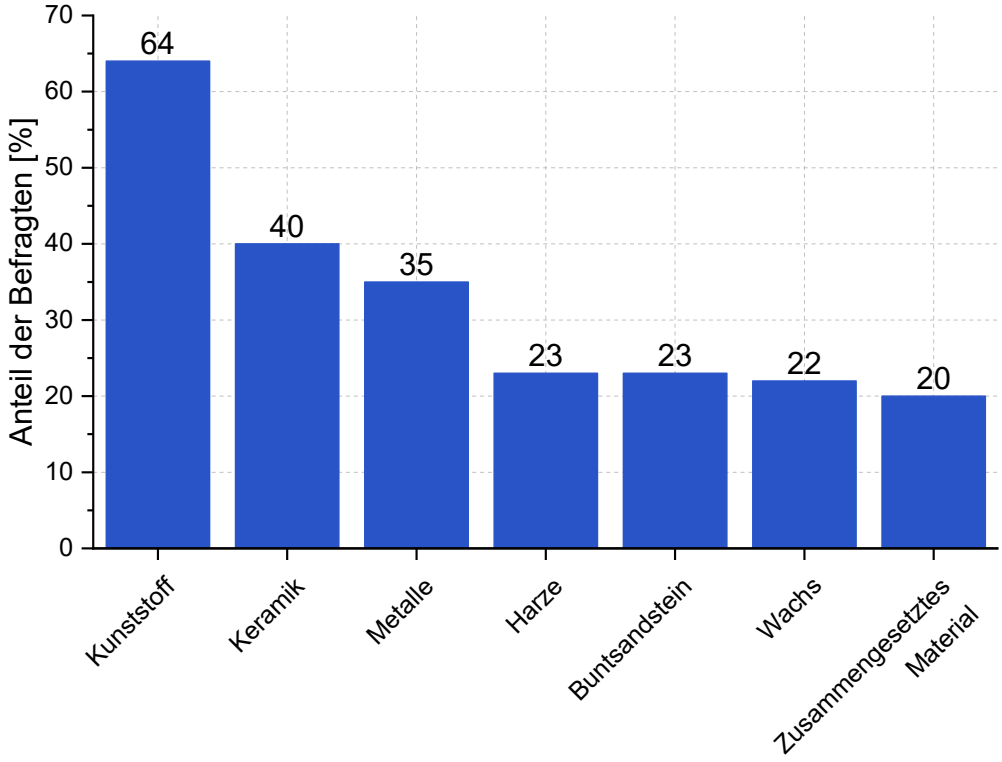



**Bild 2** Meistgenutzte Materialien beim 3D-Druck im Jahr 2020 – Weltweite Sculpteo Befragung von über 1.600 Teilnehmern aus 71 Ländern [2]

In Bild 2 sind die Werkstoffe dargestellt, die bei der additiven Fertigung verwendet werden. Im Jahr 2020 war der gängigste Werkstoff mit 64 % Kunststoff, gefolgt von Keramik und Metallen. Während die additive Fertigung von Keramiken und Metallen bisher oft nur in der Industrie eingesetzt wird, ist der 3D-Druck von Kunststoff bereits in vielen Privathaushalten zu finden und besitzt damit ein weit populäreres Umfeld. [2]

Oft ist einem Herstellungsprozess eine Nachbearbeitung der Oberfläche nachgestellt. Dies hängt ganz von der Funktionalität des Bauteils ab. So werden beispielsweise viele Bauteile, die an sichtbaren Stellen im Auto verwendet werden, lackiert. Andere Bauteile dagegen müssen bestimmte Rauheitseigenschaften besitzen, wenn sie z.B. in der Optik verwendet werden oder auch – wie bei sichtbaren Oberflächen – glatt und ansprechend aussehen sollen. Bei medizintechnischen Produkten z.B. ist nicht zwingend die glatteste Oberfläche notwendig, sondern eine gezielte Rauheit muss erreicht werden.

Eine Übersicht verschiedener Nachbearbeitungsprozesse mit der Häufigkeit der Anwendung ist in Bild 3 dargestellt. Die meisten Bauteile werden laut der

Umfrage von Sculpteo roh weiterverarbeitet. Einen hohen Anteil zur Nachbearbeitung 3D-gefertigter Kunststoffe hat das Polieren mit 64 %. [2]

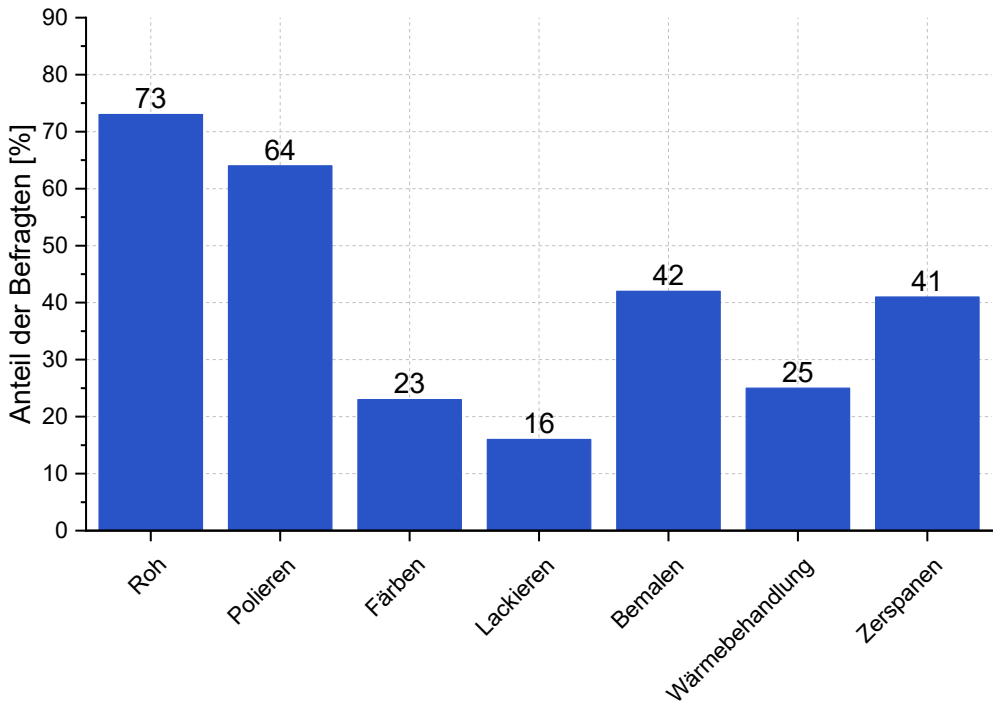



**Bild 3** Meistgenutzte Oberflächen-behandlungen nach dem 3D-Druck im Jahr 2020 – Weltweite Sculpteo Befragung von über 1.600 Teilnehmern aus 71 Ländern [2]

Die Umfragen zeigen, dass gerade die Verwendung von Kunststoff in der additiven Fertigung eine große Marktrelevanz aufweist. Das Polieren der Bauteile ist hierbei eine der häufigsten verwendeten Nachbearbeitungen. Die vorliegende Arbeit spezifiziert diese Thematik im Folgenden und beschreibt eine Art des Polierens von additiv gefertigten Kunststoff-Bauteilen, das Laserpolieren. Durchgeführt werden die Untersuchungen exemplarisch an Polyamid 12 (PA12) und anschließend für verschiedene andere Kunststoffe.

### 3.1.1 Thermisches Verhalten von Thermoplasten

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Fokus auf die Klasse der Thermoplaste gelegt. Die Makromoleküle von Thermoplasten bestehen aus linearen oder verzweigten Monometerketten, die durch zwischenmolekulare Kräfte beisammengehalten werden [3]. Thermoplaste lassen sich weiterhin in zwei Klassen aufteilen: amorphe und teilkristalline Thermoplaste.

In amorphen Thermoplasten liegen die Molekülketten in einer vollständig ungeordneten Struktur stark verzweigt vor und besitzen lange Seitenketten.

Unter Wärmeeinwirkung können die Polymerketten leicht voneinander abgleiten, sodass die Thermoplaste formbar werden. Amorphe Thermoplaste sind meist Kunststoffe, die sperrige funktionelle Gruppen in der Molekülkette besitzen. Teilkristalline Thermoplaste dagegen haben nur geringe Verzweigungen und besitzen kurze und wenige Seitenketten. Sie können aus diesem Grund eine dichtere Packung erreichen. Diese dicht gepackten Strukturen sind verstreut in die amorphen Bereiche eingegliedert und werden durch Nebenvalenzkräfte stark zusammengehalten, was das Abgleiten erschwert. Eine vollständige Kristallisation von Thermoplasten ist aufgrund der langen Polymerketten nicht möglich. Im Gegensatz zu amorphen Thermoplasten beginnen teilkristalline erst zu schmelzen, wenn die Kristallite aufgeschmolzen wurden, wobei die Schmelz- und Gebrauchstemperaturbereiche oft erhöht sind. Einmal aufgeschmolzen zeigen teilkristalline Polymere allerdings ein besseres Fließverhalten als amorphe Thermoplaste. [3–6]

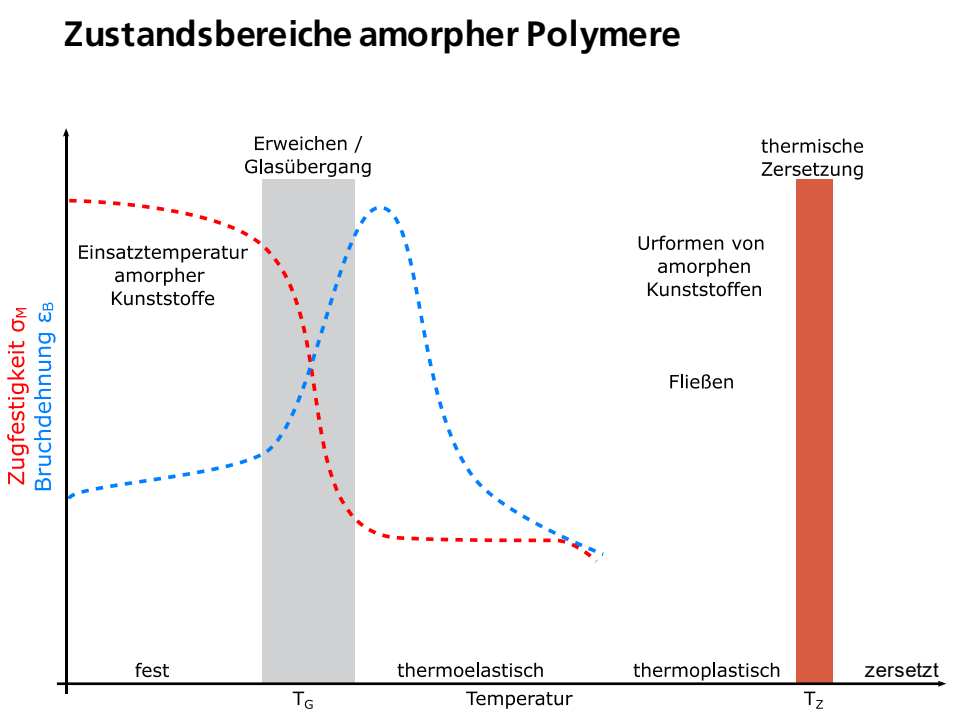



**Bild 4** Zugfestigkeit und Bruchdehnung in Abhängigkeit der Temperatur für amorphe Polymere, angelehnt an [6]

Die Temperaturübergangsbereiche zwischen fest und flüssig sind bei Kunststoffen nicht punktuell, sodass keine genaue Schmelztemperatur benannt werden kann. Dieser Übergang wird daher als Schmelzbereich, bzw. Erweichungs- oder Glasübergangsbereich bezeichnet. Die Makromoleküle selbst werden durch starke kovalente Bindungen zusammengehalten. Die Bindungen zwischen den Molekülen dagegen basieren auf schwächeren Neben-valenzkräften, die durch das Einbringen von Energie, wie z.B. einer Temperaturerhöhung, nachlassen. Auf diese Weise werden die Bindungen

geschwächt und eine Verschiebung der Molekülkette innerhalb der Struktur wird ermöglicht. Im festen Zustand liegen die Molekülketten der amorphen Thermoplaste unsortiert und „geknäult“ vor, da stets die maximale Entropie angestrebt wird. Zu diesem Zeitpunkt befindet sich das Polymer im sogenannten „Glaszustand“ oder auch „energieelastischen Bereich“. [5]

Die Temperatur ist gering und die Zugfestigkeit hoch. Die Verläufe der Zugfestigkeit über die Temperatur sind in Bild 4 und Bild 5 für amorphe und teilkristalline Kunststoffe dargestellt. Im Glasübergangsbereich ist der Kunststoff glasartig und spröde und eine mechanische Verformung ist nicht möglich. In diesem Zustand wird viel Energie benötigt, um das Polymer zum Fließen zu bewegen. [5–7]

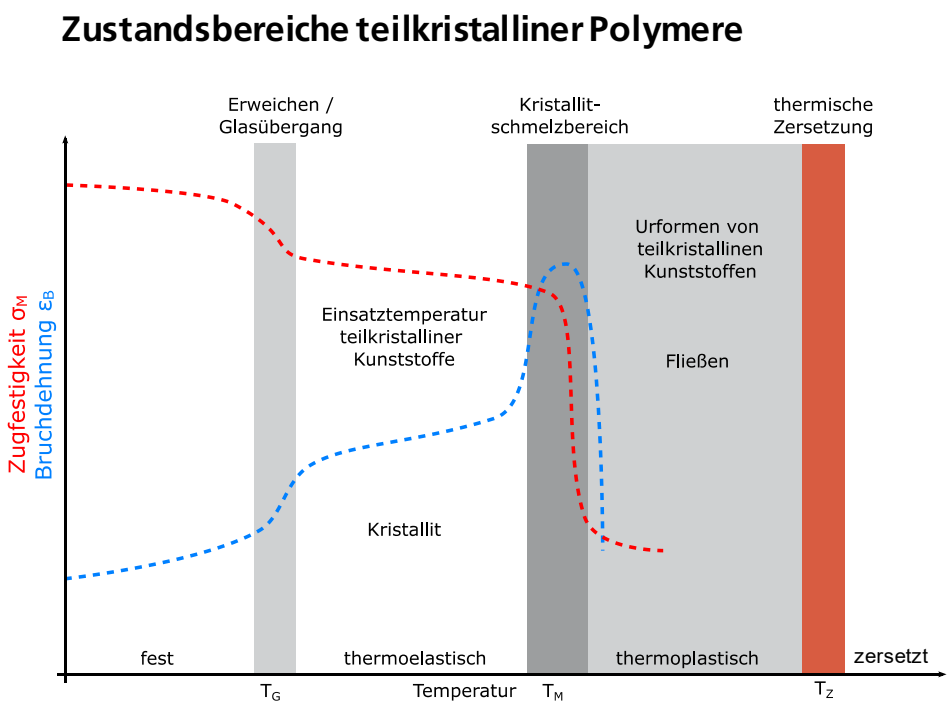



**Bild 5** Zugfestigkeit und Bruchdehnung in Abhängigkeit der Temperatur für teilkristalline Polymere, angelehnt an [6]

Mit zunehmender Temperatur erlangen die Makromoleküle untereinander mehr Beweglichkeit und die Nebenvalenzkräfte werden schwächer. Die amorphen Bereiche des Polymers lösen sich voneinander und die Zugfestigkeit wird reduziert. An dieser Stelle unterscheiden sich amorphe und kristalline Thermoplaste voneinander. Amorphe Thermoplaste sind unterhalb der Glasübergangstemperatur energieelastisch. Das bedeutet, dass die Zugfestigkeit sich verringert und die Polymere sich mit kleiner werdendem Kraftaufwand verformen lassen (Bild 4). Im Gegensatz dazu nimmt die Zugfestigkeit bei teilkristallinen Thermoplasten nahe der Glasübergangstemperatur nur unwesentlich ab (Bild 5). Dies ist durch den kristallinen Aufbau begründet. Erst oberhalb der Kristallit-Schmelztemperatur setzt eine merkliche Erweichung des

Materials ein. Oberhalb des Erweichungsbereichs sind die Polymere zunächst hoch viskos und damit zähflüssig, erst mit steigender Temperatur verbessert sich die Fließeigenschaft des Kunststoffs. [5, 7]

### 3.1.2 Rheologie von Kunststoffen

Die Rheologie beschreibt das Fließverhalten von sowohl festen als auch flüssigen Stoffen und deren Reaktion auf äußere Deformation [7]. Bei der additiven Fertigung von Kunststoffen ist die Rheologie ein ausschlaggebendes Themenfeld, sowohl bei der Herstellung als auch bei der Nachbearbeitung mittels Laserpolieren. Bei beiden Verfahren wird Kunststoff verflüssigt und das Schmelzverhalten ausgenutzt, um das Bauteil bzw. die Oberfläche zu verformen. Die Strömungsvorgänge im Schmelzbad werden weitestgehend in der Rheologie der Kunststoffe beschrieben.

In der Rheologie werden verschiedene Grundeigenschaften von Stoffen unterschieden: Viskosität, Plastizität und Elastizität. Stahlkugeln beispielsweise zeigen ein elastisches Verhalten. Werden sie aus einer Höhe fallen gelassen, springt die Stahlkugel hoch und bleibt anschließend ohne eine Verformung liegen. Plastilinkugeln dagegen zeigen ein plastisches Verhalten, sie verformen sich beim Aufprall auf dem Boden und behalten diese Verformung anschließend bei. Lässt man einen Wassertropfen auf den Boden fallen, fließt dieser nach dem Auftreffen so lange auseinander, bis die Grenzflächenspannung erreicht ist und benetzt die darunterliegende Oberfläche. Wasser weist damit ein viskoses Verhalten auf. Neben diesen drei Zuständen existiert das viskoelastische Verhalten. Dies wird z.B. durch eine Kugel aus Silikonkautschuk widergespiegelt. Diese Kugel wird beim Aufprall auf dem Boden ebenso wie die Stahlkugel mehrfach springen und anschließend liegenbleiben. Nach Eintritt der Ruhephase zerfließt die Kugel wie eine viskose Flüssigkeit. Kunststoffschmelzen weisen ein ebenso viskoelastisches Fließverhalten auf. [7]

Das Fließverhalten wird durch die Stoffeigenschaft Viskosität $\eta$ dargestellt. Die Viskosität bestimmt den Fließwiderstand eines Fluids, während es durch eine Scherkraft beeinflusst wird. Sie wird als Verhältnis aus Schubspannung $\tau$ und der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ berechnet. [3]

Die Viskosität ist bei newtonschen Flüssigkeiten eine Stoffgröße, die ausschließlich vom Druck und der Temperatur abhängig ist. Für strukturviskose Flüssigkeiten, wie Kunststoffschmelzen, ist sie zusätzlich von der Deformationsgeschwindigkeit und der Zeit beeinflusst. [7]

Die Temperaturabhängigkeit von Thermoplasten wurde bereits im vorangegangenen Kapitel 3.1.1 beschrieben. Erreicht die Temperatur die Glasübergangstemperatur beginnt das Polymer zu erweichen. Durch die vom Material absorbierte Laserstrahlung wird ein thermischer Gradient erzeugt, der

sowohl zeit- als auch ortsabhängig ist. Durch das Aufschmelzen des Materials entstehen Schichten unterschiedlicher Oberflächenspannungen, die zu einer Strömung im Material führen. Je nach Wärmequelle entstehen an verschiedenen Positionen im Bauteil unterschiedliche Schmelzschichten, die aufgrund der variierenden Temperatur in den Schichten verschiedene Viskositäten aufweisen.

In der Strömung entsteht eine innere Reibung, auch als Dissipation bezeichnet. Hierbei richten sich die Ketten langsam in Strömungsrichtung aus und beginnen sich zu ordnen. Umso stärker die Molekülketten gestreckt werden, desto weniger Energie ist notwendig, um sie aneinander vorbei gleiten zu lassen. Die Viskosität sinkt. [7]

### 3.1.3 Additive Fertigung mit Polymeren

Als Erfinder des 3D-Drucks gilt der US-Amerikaner Chuck Hull, der im Jahr 1984 das erste Patent zum 3D-Druck und dem Stereolithografie (SLA) Verfahren anmeldete [8]. Seitdem haben sich verschiedene Arten des 3D-Drucks etabliert, die die Anwendung der SLA langsam in der Anwendungshäufigkeit vertreiben.

Eine Umfrage von Sculpteo aus dem Jahr 2018 [9] zeigt die Häufigkeit der Anwendung verschiedener 3D-Druck Methoden. Das Ergebnis ist in Bild 6 dargestellt. Am häufigsten werden die Verfahren »Fused Deposition Modeling« (FDM), »Selective Laser Sintering» (SLS) und »Stereolithography« (SLA) verwendet. Die additive Fertigung von Kunststoffen findet sowohl in der Industrie als auch im Privathaushalt vielfältige Anwendung. Während Druckmethoden, wie beispielsweise der FDM-Druck, häufig privat angewendet werden, werden kostenintensivere Verfahren, wie z.B. das SLS, vorwiegend industriell verwendet.

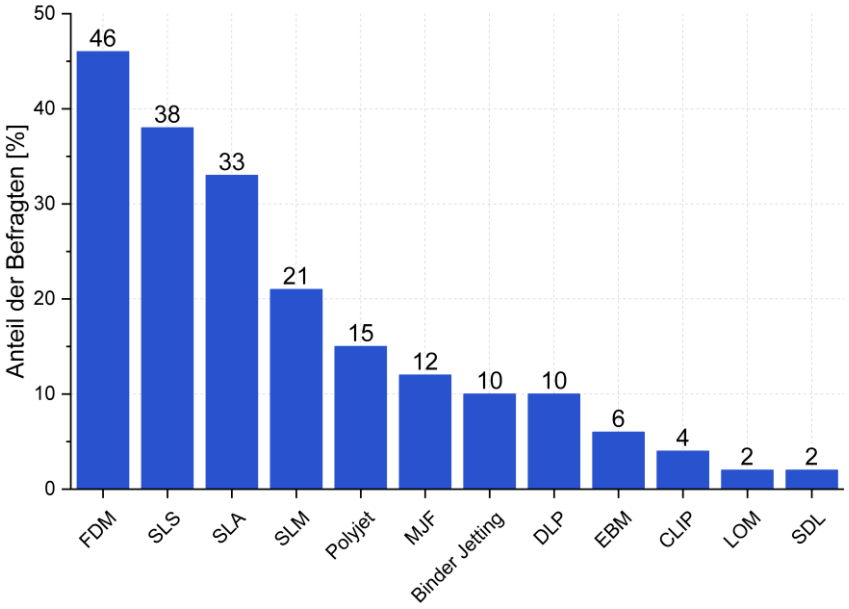



**Bild 6** Meistgenutzte 3D-Druck Techniken im Jahr 2018 – Quelle Sculpteo Weltweite Befragung von 1.000 Teilnehmern [9]

Anwendungs- und materialtechnisch unterscheiden sich die verschiedenen Verfahren stark voneinander. Das FDM-Verfahren arbeitet hauptsächlich mit amorphen Thermoplasten. Der Kunststoff wird in Form eines Filaments durch eine beheizte Düse erwärmt und extrudiert. Im erwärmten Zustand verschweißen die aufgelegten Schichten und bilden einen Verbund. Das SLS ist dagegen laserbasiert und verarbeitet statt Filament Kunststoffpulver. Das häufigste verwendete Polymer für die SLS-Fertigung ist Polyamid 12 (PA12). Das Pulver wird in einem Pulverbett bereitgestellt und anschließend ortsaufgelöst mit dem Laser aufgeschmolzen. Durch das Erhärten des Kunststoffes entsteht anschließend das neue Bauteil. Das Urverfahren, die Stereolithografie, verwendet ebenfalls einen Laser, aber im Gegensatz zum SLS einen UV-Laser. Hierfür werden Kunststoffe verwendet, die bei UV-Lichteinwirkung aushärten, wie beispielsweise Acrylate oder Epoxide. [1, 10]

Die in dieser Dissertation verwendeten Proben werden mit den am häufigsten verwendeten Methoden der additiven Fertigung, dem FDM-Druck und dem SLS-Druck hergestellt. Die mittels FDM gedruckten Proben erreichen eine durchschnittliche Flächenrauheit von ca. 0,69 µm und die mittels SLS gefertigten Proben eine von ca. 2,75 µm. Die Verteilung der Rauheitswerte Sa über verschiedene Filterortswellenlängen können in Kapitel 6.3.1 nachgelesen werden.

### 3.1.4 Polieren von Kunststoffen

Additiv gefertigte Kunststoffe werden in vielen verschiedenen Branchen eingesetzt und unterliegen daher stark unterschiedlichen Spezifikationen. Gerade die Oberfläche der Bauteile ist ein entscheidendes Merkmal, das in verschiedenen Anwendungsbereichen von großer Bedeutung ist. Rohbauteile haben oft eine sehr hohe Rauheit und ein fest parametrisierter Prozess gibt nur eine Einheitsrauheit für die entsprechende Maschine aus. Aus diesem Grund ist ein Oberflächenfinish für viele Anwendungen notwendig, wie bereits die in Kapitel 3.1 beschriebene Anwendungsstatistik gezeigt hat. Im Folgenden sind einige Bearbeitungsprozesse zum Polieren von Kunststoffen aufgezeigt. [1]

Das manuelle Polieren wird, wie für andere Materialien, auch bei Kunststoffen verwendet. Hier wird mit speziellen Schleif- und Glanzwachsen gearbeitet. Per Hand werden sogenannte Schwabbelscheiben oder gefaltete Polierringe verwendet. Wichtig ist beim Schleifen von Kunststoffen, dass auf niedrige Temperaturen geachtet wird, damit der Thermoplast sich nicht wieder erweicht und dadurch verformt. [11]

Das Gleitschleifen, das bereits in der Metallbearbeitung etabliert ist, wird auch zum Oberflächenfinish für Kunststoffe verwendet. Hier werden für Kunststoffe geeignete Schleifkörper und Netzmittel verwendet. Das größte Problem des Gleitschleifens ist, dass bei stark komplexen Strukturen die Kanten und Ecken stark abgerundet werden können und somit die Form des Bauteils stark beeinflusst wird. Ein grundlegender Nachteil beim Gleitschleifen der Bauteile ist der damit zusammenhängende Abrieb der Oberfläche. So entsteht zum einen direkt während des Schleifens Staub, der gesundheitliche Schäden mit sich bringen kann, und zum anderen muss der Staub bzw. der Abrieb entsorgt werden. [1]

Ein weiteres Beispiel ist der sogenannte »Push Process« der Universität Sheffield, der SLS-Bauteile durch den Einsatz von Lösemitteln in der Dampfphase glättet. Der Vorteil des Verfahrens ist, dass die Komplexität des Bauteils keinen Einfluss auf das Glättungsergebnisses hat. Allerdings werden hierzu stark toxische und aggressive Chemikalien verwendet. Diese sind einerseits sehr kostenintensiv und andererseits müssen diese anschließend aufwendig entsorgt werden. [1]

## 3.2 Laserpolieren

Das Polieren mittels Laserstrahlung ist bereits für verschiedene metallische Werkstoffe etabliert und wurde anschließend auf andere, wie z.B. Glas übertragen. Das Verfahren existiert in drei Verfahrensvarianten. Dem flächigen Abtragen, dem selektiven Abtragen und dem Polieren durch Umschmelzen. Beim flächigen Abtragen wird hauptsächlich gepulste Laserstrahlung verwendet, mit der die hervorstehenden Spitzen und Profilkuppen stärker abgetragen werden

als Profiltäler. Auf diese Weise entsteht eine Glättung der Materialoberfläche. Beim selektiven Abtragen werden gezielt die Profilkuppen und -Spitzen entfernt, indem die aktuelle Topografie der Oberfläche vermessen wird. Diese Methode ist meist sehr zeit- und kostenaufwendig aufgrund der aufwendigen Messtechnik. Beim Polieren durch Umschmelzen wird durch die Entstehung eines Schmelzbades das Material aufgrund der Grenzflächenspannungen von den Profilkuppen in die Profiltäler umgelagert, sodass eine glatte Oberfläche entsteht. [12]

Das Material wird aufgeschmolzen und umverteilt, sodass kein Materialverlust entsteht. So wird zum einen die Entsorgung des Abriebs hinfällig und Gefährdungen durch Feinstaub werden vorgebeugt. Da der Laser als einziges Werkzeug beim Laserpolieren dient, werden auch keine chemischen Substanzen verwendet, die Gefährdungen mit sich bringen und anschließend entsorgt werden müssen. Für den Schutz des Personals ist einzig eine geeignete Schutzvorkehrung gegen Laserstrahlung notwendig sowie eine geeignete Einhausung der Laseranlage inklusive Absaugung, da bei Verbrennung des Kunststoffs schädliche Dämpfe entstehen können, wenn die Temperatur zu hoch gewählt wird. Außerdem ist das Laserpolieren eine höchstpräzise Methode, die selektiv verwendet werden kann und auch Kanten und Ecken werden nicht abgerundet.

### 3.2.1 Grundlagen des Laserpolierens

Das Polieren mittels Laserstrahlung ist ein thermisches Verfahren und basiert auf der Absorption der Laserstrahlung in den obersten Randschichten des Werkstoffs. Abhängig von den Stoffeigenschaften des Werkstoffs und der Parametrisierung des Lasers verflüssigt sich das Material und die Schmelze beginnt zu fließen. Durch die herrschende Grenzspannung wird die Oberfläche geglättet. [12]

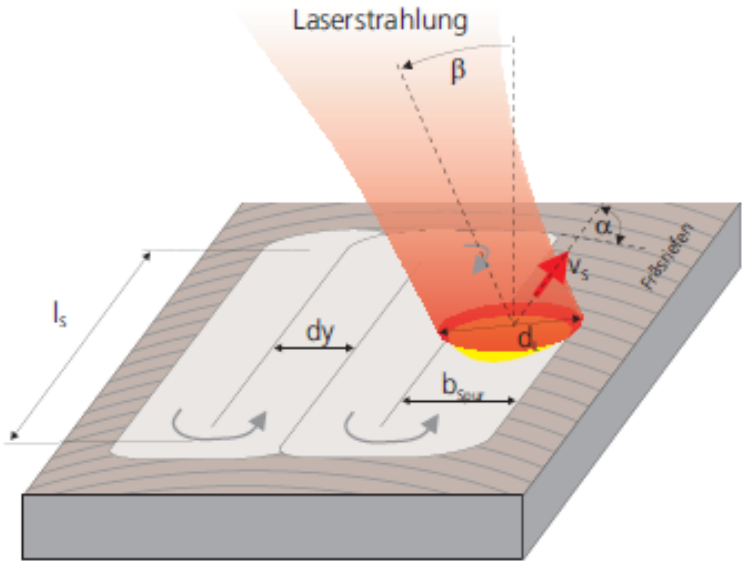



**Bild 7** Schematische Darstellung des Laserpolierens [12]

$l_s$: Scanvektorlänge
dy: Spurversatz
$d_L$: Laserstrahl-durchmesser am Werkstück
$b_{Spur}$: Spurbreite
α: Bearbeitungs-richtung zur Frässtruktur
$v_s$: Scan-geschwindigkeit
β: Einfallswinkel des Laserstrahls

Zur Erklärung, wieso die Oberfläche während des Aufschmelzens geglättet wird, hat bereits E. Willenborg in Hinsicht auf Werkzeugstähle das Druck- und Geschwindigkeitsfeld innerhalb der Schmelze herangezogen [12]. Diese Erklärung wurde von A. Richmann in der Untersuchung für Quarzglas aufgegriffen und auf die Unterschiede der Materialien angepasst. A. Richmann beschreibt den Kapillardruck im Schmelzbad als treibende Kraft für die Formänderung, da dieser dazu beiträgt, dass die Schmelzbadströmung eine Minimalfläche ausbildet. [13]

Durch die Erwärmung der Oberfläche wird die Grenzflächenspannung an der Schmelzbadoberfläche gesenkt, sodass die Schmelze beginnt zu fließen. Ausschlaggebend für die Flusseigenschaften ist hierbei die Stoffeigenschaft Viskosität η. Durch eine hohe Rauheit wird die Oberfläche stark vergrößert. Im schmelzflüssigen Zustand versucht die Oberflächenspannung allerdings eine möglichst minimale Fläche auszubilden. Zusätzlich herrschen sekundäre Effekte, wie z.B. die Erdanziehung, durch die die Teilchen sich möglichst nah zum Erdmittelpunkt orientieren, sodass die verflüssigten Spitzen tendenziell eher in die Täler fließen und somit das Oberflächenprofil ausgleichen.

Das Strömungsverhalten in Fluiden, also auch in Schmelzbädern, wird, wie bereits in den Arbeiten von A. Richmann und E. Willenborg beschrieben, durch die Navier Stokes Gleichung erklärt (siehe Formel 3.1). [12, 13]

**3.1**

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \vec{v} + \rho\left(\vec{v} \cdot \vec{\nabla}\right) \vec{v} = -\vec{\nabla} p + \eta \vec{\nabla}^2 \vec{v} + \rho \vec{f}$$

Die linke Seite der Gleichung setzt sich aus der Änderung der Beschleunigung an einem Ort zusammen. Die Masse wird hierbei durch die Dichte des Fluids ersetzt. Zusätzlich wird ein Konvektionstherm $\left(\left(\vec{v} \cdot \vec{\nabla}\right)\vec{v}\right)$ eingefügt, der die Änderung der Geschwindigkeit von Ort zu Ort berücksichtigt. Auf der rechten Seite der Gleichung beschreibt $-\vec{\nabla}\,p$ die Druckänderung durch die unterschiedlichen statischen Drücke im Fluid. Der mittlere Term $\eta\,\vec{\nabla}^2\,\vec{v}$ beschreibt die verschiedenen Geschwindigkeiten innerhalb des Fluids, welche durch die unterschiedlich stark geschmolzenen Schichten entstehen. Durch die unterschiedlichen Schichten entstehen innere Schubkräfte, da die Schichten verschiedene Geschwindigkeiten aufweisen und dadurch aneinander vorbeifließen. Diese werden hauptsächlich durch die Viskosität η bestimmt. Der letzte Term $(\rho\,\vec{f})$ beschreibt zusammengefasst äußere Kräfte, die auf das Schmelzbad einwirken, wie beispielsweise die Erdanziehung. Die äußeren Kräfte neben der Viskosität und der Schubkräfte werden als vernachlässigbar angesehen. [12, 13]

Das Laserpolieren von Kunststoffen gleicht vom Verfahren her eher dem Laserpolieren von Gläsern als dem von Metallen. Die für das Laserpolieren relevanten Parameter ergeben sich durch das Material und die Temperatur-Zeit-Verläufe während des Prozesses. Die antreibende Kraft ist hierbei die Oberflächenspannung, die wie oben beschrieben zu der Glättung des schmelzflüssigen Materials führt. Durch die Oberflächenspannung wird die Oberfläche stets minimiert. Die dadurch entstehende Kraft auf Teilchen an der Oberfläche wirkt in Richtung Materialinneres und bewegt somit die Teilchen zur Ausbildung einer minimalen Oberfläche. Die Viskosität beschreibt den Fließwiderstand des Materials und wirkt damit der treibenden Kraft der Oberflächenspannung entgegen. In Kapitel 5 und Folgende werden diese Zusammenhänge für das Laserpolieren von Kunststoffen detailliert diskutiert. [12]

Die Temperatur-Zeit-Verläufe werden durch die Prozesstemperatur, die laterale Abmessungen im Schmelzbad und die Wechselwirkungszeit zwischen Laserstrahlung und Material bestimmt. [12, 13]

Die Prozesstemperatur wird durch die eingestellten Laserparameter Scangeschwindigkeit, Laserstrahldurchmesser, Spurüberlagerung und Anzahl der Überfahrten beeinflusst. Diese Parameter tragen dazu bei, wie sich die Temperatur während des Prozesses im Material entwickelt. Die Prozesstemperatur muss sich für die erfolgreiche Laserpolitur innerhalb der Materialgrenzen Schmelzbereich und Verbrennungsbereich befinden.

**3.2**

$$t_w = \frac{b}{v_{scan}} \cdot \frac{d_s \cdot dy\ - h}{d_s\ \cdot (dy - 1)}$$

Die Wechselwirkungszeit $t_w$ lässt sich anhand Formel 3.2 bestimmen. Sie ist abhängig von der Spurbreite b, der Scangeschwindigkeit $v_{scan}$, dem Laserstrahldurchmesser $d_L$, der Spurüberlagerung dy und der Höhe des bearbeiteten Feldes h. Die Wechselwirkungszeit ist für Kunststoffe von besonderer Bedeutung, da die Polymerketten der Kunststoffe beginnen, sich unter Einwirkung des Temperaturgradienten zu strecken. Dadurch, dass die Temperatur zur Mitte des Schmelzbads hin ansteigt, wird ein Temperaturgradient erzeugt, der wiederum die Oberflächenspannung beeinflusst. Der entstehende Gradient der Oberflächenspannung führt zu einer Bewegung der Schmelze und dadurch zu einer Glättung. Umso kürzer die Wechselwirkungszeit ist, desto weniger Zeit haben die einzelnen Ketten sich zu glätten und desto rauer bleibt die Oberfläche.

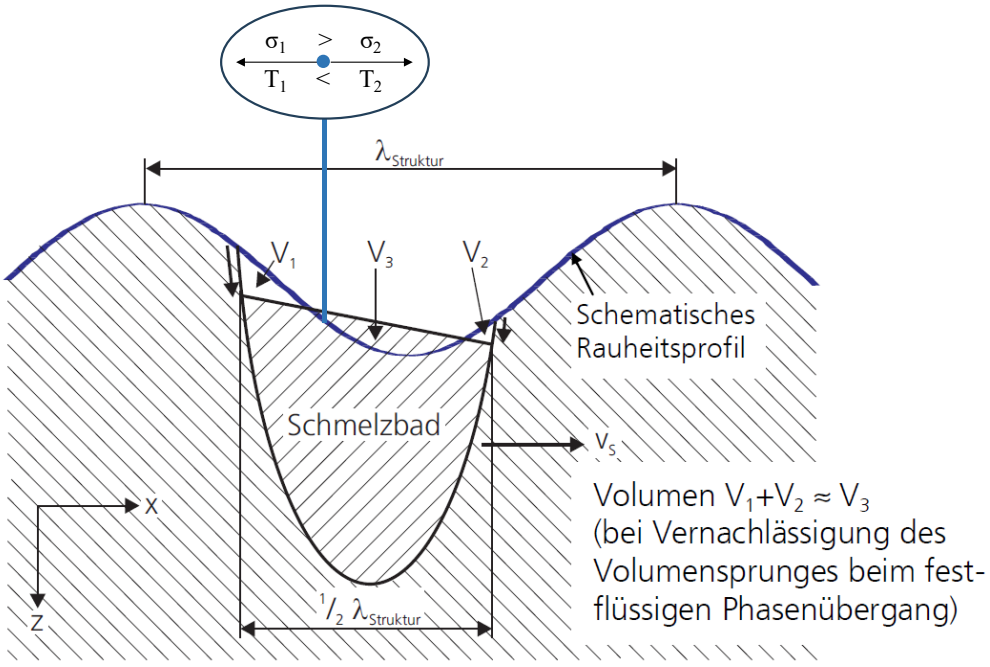



**Bild 8** Schematische Darstellung des Materialausgleichs in der schmelzflüssigen Phase [12]

Die laterale Abmessung des Schmelzbads wurden bereits in der Dissertation von E. Willenborg als relevant für das Laserpolieren beschrieben. Laut E. Willenborg sollte der Laserstrahldurchmesser mindestens so groß gewählt werden wie die halbe Wellenlänge der Oberflächenstruktur. Zu groß sollte der Laserstrahldurchmesser allerdings auch nicht gewählt werden, da umso größer der Laserstrahldurchmesser ist, desto ausgeprägter sind die Bewegungen innerhalb des Schmelzbades. Dies kann zu einer höheren Welligkeit führen. [12] Die besondere Bedeutung der lateralen Abmessung beim Laserpolieren von Kunststoffen wird in Kapitel 5 diskutiert.

### 3.2.2 Bisherige Untersuchungen zum Laserpolieren von Kunststoffen

Das Laserpolieren wird vom Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT seit etwa 2000 ausgiebig erforscht. Grundsätzliche Arbeiten zum Laserpolieren verschiedener Werkstoffe fanden aber schon weit früher statt. Bereits im Jahr 1982 führten Temple et al. [14] Versuche zum Laserpolieren von Quarzglas mit $CO_2$-Laserstrahlung durch. Metallische Oberflächen und CVD-Diamantschichten wurden erstmals 1996 mit Laserstrahlung bearbeitet.

Erste Ergebnisse zum Laserpolieren von Kunststoffen werden im Folgenden erläutert und sind zusammenfassend in Tabelle 1 dargestellt.

**Tabelle 1** Übersicht der bisherigen Untersuchungen zum Laserpolieren von Kunststoffen [13, 15–19]

| Autor | Als einflussreichster Parameter deklarier | Material | Jahr |
|---|---|---|---|
| T. Grumpenberger et al | Temperatur | PTFE | 2005 |
| A. Richmann | Wechselwirkungszeit<br>Anzahl Überfahrten | PC | 2013 |
| Y. Chai et. al | Scangeschwindigkeit<br>Spurüberlagerung | ABS, PLA | 2018 |
| M. Layher et. al | Wechselwirkungszeit<br>Anzahl Überfahrten | ABS, PLA, PA6, SAN, PMMA, PE, PP, PC, PC-ABS | 2019 |
| K. Braun et. al | Temperatur<br>Wechselwirkungszeit<br>Probenfeuchtigkeit | PA12, TPU, ABS, PEEK | 2020, 2023 |

Im Jahr 2005 begannen T. Grumpenberger et al. erstmals auch Kunststoffe, in diesem Fall PTFE, mit dem Laser zu polieren. Sie benutzten einen gepulsten Laser mit der Wellenlänge von 157 nm und definierten die Temperatur als das wichtigste Kriterium für die erfolgreiche Politur mit Laserstrahlung. [14]

Im Jahr 2013 wurde in der Dissertation von Annika Richmann [13], neben dem Polieren von Gläsern, erstmals Polycarbonat als Vertreter der Polymere mit dem

Laser poliert. Die Erkenntnisse dieser Untersuchungen lagen vor allem in der Definition der Wechselwirkungszeit zwischen Laserstrahlung und Material als wichtigster Parameter zur Erzeugung glatter Oberflächen. Die Proben wurden mit einem Linienfokus bearbeitet, wobei die Temperatur in der Mitte der Linie mit Hilfe eines Pyrometers geregelt wurde. Die Prozesstemperatur darf nach Aussagen A. Richmanns nicht die Verdampfungstemperatur überschreiten, da der Kunststoff beginnt sich zu zersetzen und Rauheiten im hohen Ortswellenlängenbereichen sich erhöhen. Bei Polycarbonat werden knapp unterhalb der Verdampfungstemperatur bei ca. 300 °C die besten Ergebnisse erzielt. Als weiterer wichtiger Parameter wurden die Anzahl Überfahrten herausgestellt, die die Rauheit in allen Ortswellenlängen reduziert. Unterschiede in der Scangeschwindigkeit von 1.000 mm/s bis 5.000 mm/s zeigten auf die Reduktion der Rauheit keinen Einfluss. Die Nutzung einer Schutzgasatmosphäre zur Reduktion hatte ebenfalls keinen Effekt. Allerdings ist die Reinigung der Probe sinnvoll, da Fremdkörper, wie z.B. Staubpartikel, entfernt werden und somit nicht eingebrannt werden können. Das Vorheizen der Proben kann thermischen Spannungen im Material vorbeugen, reduziert aber ebenfalls nicht die Oberflächenrauheit. Grundsätzlich wurden beim Laserpolieren von Polycarbonat Rauheiten von Rq = 20 nm und ein Peak-Valley-Abstand von 20 µm erreicht. Dies entspricht in etwa den Werten einer kommerziellen manuellen Politur. [13]

Yuan Chai et al. von der Australian National University [15] untersuchten das Laserpolieren von FDM gedruckten Kunststoffproben aus PLA und ABS mit einem $CO_2$-Laser. Kommerzielle Nachbearbeitungen, wie z.B. chemisches Polieren, Metallbeschichtungen oder Epoxy- oder Polyurethanbeschichtungen führten zu keinem zufriedenstellenden Glättungsergebnis. Das Laserpolieren wurde hier als kostengünstige und effiziente Alternative zur Glättung der Oberflächen beschrieben. Das Ergebnis der Untersuchungen unterschied sich stark abhängig vom Material. Für PLA wurde bei einer Ausgangsrauheit von 14,42 µm eine Endrauheit von 4,64 µm erreicht, also eine Rauheitsreduktion von ca. 67 %. Die Rauheit beschreibt in diesem Fall die Flächenrauheit Sa nach der DIN ISO 4288 [20]. Bei ABS dagegen wurde lediglich eine Rauheitsreduktion von 3 % erreicht, was die Autoren auf eine größere Oberflächenspannung des ABS zurückführen. Laut Yuan Chai et al. Ist eine große Problematik bei 3D-gedruckten Bauteilen vor allem die Bestimmung der Materialeigenschaften (wie z.B. Schmelz- und Verbrennungstemperatur), die sich stark von den Ursprungsmaterialien unterscheiden können. In der Literatur sind oft nur die physikalisch-thermischen Eigenschaften der Ausgangsmaterialien zu finden. Da bisher noch keine Versuche zum Laserpolieren von PLA und ABS bekannt waren, wurden grundsätzlich die Parameter vom Metallpolieren verwendet mit einer geringeren Laserleistung. Bearbeitet wurde auch hier mit einem gaußförmigen Laserstrahl. Die bei 10,6 µm Wellenlänge untersuchten Parameter waren die Laserleistung, die Scangeschwindigkeit, die Scanpausen (scan delay) und der Spurabstand zwischen zwei Bearbeitungsspuren. Die besten Ergebnisse wurden mit einer

Laserleistung von 3 W, einer Scanpause von 30 ms, einem Spurüberlagerung von 0,05 mm und einer Scangeschwindigkeit von 150 mm/s erzielt. Grundsätzlich haben Yuan Chai et al. herausgefunden, dass eine Variation der Scanpause zu keiner Reduktion der Rauheit führt. Eine Erhöhung der Scangeschwindigkeit sowie eine Reduktion der Spurüberlagerung dagegen haben zu einer geringeren Rauheit geführt. Allerdings wurden diese Ergebnisse bisher nur in kleinem Umfang durchgeführt und sind damit noch nicht statistisch bewiesen. [15]

Im Jahr 2019 haben M. Layher et al. [17] eine große Auswahl an Kunststoffen getestet, die am häufigsten für das Fused Layer Modeling (FLM) Drucken verwendet werden. Diese Studie stellt grundsätzlich eine Machbarkeitsstudie dar und keine Bestimmung der Einflussgrößen. Untersucht wurden ABS, PA6, PMMA, PE, SAN, PC und drei Arten PLA. Die Proben wurden im Spritzgussverfahren hergestellt. Variiert wurden die Intensität sowie die Scangeschwindigkeit mit einem $CO_2$-Laser mit 10,6 µm Wellenlänge. Die Temperatur wurde stets knapp unter der Verbrennungstemperatur gehalten, da hier die Viskosität vor dem Verbrennen am niedrigsten ist und somit die Fließfähigkeit im Schmelzbad dadurch am höchsten. Die Scangeschwindigkeit betrug durchschnittlich 1000 mm/s und die Intensitäten ca. 1 W/mm². Die Ergebnisse zeigten grundsätzlich, dass hohe Geschwindigkeiten zu einem effizienten und guten Polierergebnis führen, aber gleichzeitig die Dauer des Materialflusses verringern. Auf diese Weise lässt sich Mikrorauheit gut reduzieren, aber typische Oberflächenmerkmale, wie z.B. eine hohe Welligkeit durch die Filamentstruktur, die beim FLM-Drucken entstehen, werden nicht entfernt. Hierzu muss die Wechselwirkungsdauer erhöht werden, indem zum Beispiel die Laserleistung verringert oder der Überlapp zwischen den Bearbeitungsspuren erhöht wird, um Verbrennungen zu vermeiden. Zudem sind Mehrfachüberfahrten ein gutes Mittel zur weiteren Reduktion der Rauheit. [17] Dies entspricht den Beobachtungen von A. Richmann [13] bei Polycarbonat.

Die Polierergebnisse werden in der Veröffentlichung von M. Layher et al. [17] nicht ausführlich beschrieben, sondern nur die Eigenschaften der verschiedenen Kunststoffe hinsichtlich der Laserpolitur. M. Layher et al. geben die Rauheit mittels quadratischen Mittelrauheitswert Rq an. Entsprechend der Ergebnisse von Y. Chai et al. [15] kann die Oberflächenrauheit von PLA besonders gut reduziert werden. Hier wird eine Reduktion von 99,96% der Ausgangsrauheit erreicht hinsichtlich der Rauheitskenngröße Rq. Aus dem Material PLA wurden drei verschiedene Varianten laserpoliert. Mit allen wurden exzellente Ergebnisse erzielt. Hier ist allerdings zu betonen, dass dies die lokal größte Rauheitsreduktion darstellt, die Homogenität über die Oberfläche aber nicht berücksichtigt wird. ABS ließ sich auch in diesem Fall nicht erfolgreich laserpolieren. Dies wird von M. Layher et al. mit der Zusammensetzung von ABS begründet. Dieses enthält Butadiene, sodass der Kunststoff sich wie vernetztes Gummi verhält. Dies führt dazu, dass sich die Makrostrukturen während des Laserpolierens verformen, sodass kein signifikanter Materialfluss entsteht. Als Alternative zu ABS kann SAN

verwendet werden, auf welchem laut M. Layher et al. eine niedrigere Oberflächenrauheit durch das Laserpolieren erreicht werden kann. PMMA erzielt ähnliche Ergebnisse wie SAN und erreicht eine Endrauheit von Rq < 5 nm. Die Ergebnisse von PE, LDPE und PP zeigen ebenfalls eine Rauheitsreduktion, so wird z.B. auf PE eine Reduktion von 99,48 % erreicht. Die Kunststoffe sind für ein großes Prozessfenster beim Laserpolieren geeignet und neigen nicht zur Blasenbildung, sodass auch hier eine erfolgreiche Prozessoptimierung möglich ist. Schlechte Ergebnisse dagegen wurden mit PC, ABS und PA6 erreicht. Diese drei Kunststoffe neigen stark zur Blasenbildung und zeigten keine sonderlich gute Rauheitsreduktion durch das Laserpolieren. [17]

Parallel zur vorliegenden Dissertation wurden im Jahr 2020 von K. Braun et. al [18] die Kunststoffe PA12, PP, TPU, ABS und PEEK untersucht. Diese Arbeiten liefen parallel zu den in dieser Dissertation durchgeführten Versuchsreihen und wurden erst nach Fertigstellung dieser veröffentlicht. Die Versuche wurden temperaturgeregelt durchgeführt. Anders als in dieser Dissertation wurde die Prozesstemperatur aber nicht ortsaufgelöst gemessen, sondern zentral in der Mitte der Probe, sodass schnelle Änderungen in der Temperatur nicht detailliert erfasst werden können. Ziel der Untersuchungen war die Entwicklung einer neuen Bearbeitungsmethode neben der Linienbearbeitung, die als „quasi-top-hat“ bezeichnet wird. Hierbei wird mit einer schnellen Scangeschwindigkeit die Oberfläche in einem Zackenmuster abgefahren. Die Untersuchungen zeigten, dass das Trocknen der Proben zu einer höheren Rauheitsreduktion beim Laserpolieren führte, wobei dieser Aspekt noch detaillierter untersucht werden sollte. Außerdem erwies sich die quasi-top-hat-Strategie als gut geeignet für große Areale, die laserpoliert werden sollen. Als einflussreiche Parameter werden außerdem die Wechselwirkungszeit und die Prozesstemperatur genannt. Die gewählte Wechselwirkungszeit ist laut. K. Braun et. al hauptsächlich abhängig von der Viskosität und der Oberflächenspannung des Materials. [18, 19]

Insgesamt wurden schon einige Kunststoffe für das Laserpolieren untersucht, allerdings wurden größtenteils nur Untersuchungen ohne Wiederholungen durchgeführt, die statistisch nicht belastbar sind. Außerdem wurden grundverschiedene Parametereinstellungen und Lasersetups verwendet und unterschiedliche Rauheitskennwerte verglichen, sodass eine Meta-Analyse zur Eignung einzelner Kunststoffe für das Laserpolieren notwendig ist.

## 3.3 Oberflächenrauheit

### 3.3.1 Definition und Kenngrößen

Oberflächenunregelmäßigkeiten unterscheiden sich grundsätzlich in Welligkeit und Rauheit. Die Unterscheidung basiert auf dem Verhältnis der Länge und Tiefe der Unregelmäßigkeit. Wenn die periodisch auftretenden Intervalle, in denen Unregelmäßigkeiten auftauchen, länger sind als die Tiefe der Unregelmäßigkeit

spricht man von Welligkeit. Als Rauheit werden Abweichungen bezeichnet, die unregelmäßig sind und in Zyklen kleiner als die Tiefe der Unregelmäßigkeit auftreten. Beide Zustände werden in verschiedenen DIN-Normen anhand zahlreicher Kennwerte definiert. Die DIN-Normen definieren die Kennwerte zur Beschreibung der Oberflächenbeschaffenheit durch das Tastschnittverfahren und sind nicht für berührungslose Messverfahren angepasst. Da bisher aber noch keine Definition für diese Messverfahren festgelegt wurde, werden die Definitionen des Tastschnittverfahrens verwendet. [21]

Mit der Messung einer Oberfläche wird entweder ein Oberflächenprofil oder eine Fläche ermittelt, deren Rauheitskenngrößen berechnet werden. Zur Berechnung dieser Kenngrößen existieren verschiedene Normen. Zur Berechnung des Oberflächenprofils wird dieses zur Vorbereitung mit verschiedenen Filtern bearbeitet, die die gleiche Übertragungscharakteristik haben, wie in EN DIN ISO 11562 definiert, aber unterschiedliche Grenzwellenlängen [22]. Zuerst wird ein $\lambda_S$-Profilfilter angewandt, das das Profil von den Anteilen mit noch kürzeren Wellenlängen als der Rauheit trennt [23]. Auf diese Weise entsteht das Primärprofil, das laut EN DIN ISO 3274 die Ausgangsbasis zur Rauheits-berechnung darstellt. Bevor das Filter angewendet wird, soll auf das Profil die Methode der kleinsten Summe der Abweichungsquadrate angewandt werden. [24] Das entstandene Primärprofil wird durch die Filterung durch das Profilfilter $\lambda_C$ in ein Rauheits-Profil und ein Welligkeitsprofil aufgeteilt. Auf das Welligkeitsprofil wird anschließend das Profilfilter $\lambda_f$ angewendet, das die langwelligen Anteile abtrennt. Die geometrischen Kenngrößen können später für jede Art des Profils berechnet werden, wobei die Kennwerte des Primärprofils mit „P" benannt werden, die des Rauheitsprofils mit „R" und die des Welligkeitsprofil mit „W". [23] Je nach Einsatz der Filtereigenschaften kann die Oberflächenrauheit in verschiedenen Ortswellenlängenbereichen berechnet werden. So kann anhand des Ergebnisses entweder die Mikrorauheit bei kurzen Ortswellenlängen betrachtet werden oder die Makrorauheit bei langen Ortswellenlängen.

Der gebräuchlichste Oberflächenkennwert ist der arithmetische Mittelwert der Profilordinaten Ra. Die Rauheitskenngröße Ra berechnet sich aus dem arithmetischen Mittel der Profilordinaten Z(x) innerhalb einer Einzelmessstrecke l anhand von Formel 3.3. [23]

**3.3**

$$Ra = \frac{1}{l} \cdot \int_0^l |\, Z(x)|\, dx$$

Der arithmetische Mittenrauwert wird bevorzugt dazu verwendet, allmähliche Veränderungen, wie etwa bei einem Werkzeugverschleiß, zu überwachen. Durch die Mittelwertbildung wird nicht jede Profilspitze oder jedes Profiltal unterschieden. Andererseits macht genau diese Eigenschaft die Kenngröße robust, da nicht jeder Ausreißer unter ungünstigen Umgebungsverhältnissen oder Messfehler das Messergebnis stark beeinflussen. [21] Für flächige

Beobachtungen wird der arithmetische Mittelwert nicht über ein Profil bestimmt, sondern über die gesamte Oberfläche und wird dann als Sa bezeichnet.

### 3.3.2 Weißlichtinterferometrie

Mittels Weißlichtinterferometrie (WLI) kann die Topografie einer Oberfläche berührungsfrei gemessen werden. Herkömmliche Weißlichtinterferometer funktionieren nach dem Prinzip des Michelson Interferometers (siehe Bild 9). Als Quelle wird ein Weißlichtstrahler verwendet, da die Kohärenzlänge von breitbandigem Licht sehr klein ist. Die Lichtwelle wird durch einen Strahlteiler in einen Referenz- und einen Messstrahl aufgeteilt. Der Messstrahl wird auf das Objekt gerichtet, dessen Oberflächentopografie ermittelt werden soll, und wird durch das Objekt reflektiert und gegebenenfalls gestreut. Der Referenzstrahl trifft auf einen vollständig reflektierenden Spiegel. Die reflektierten Strahlen treffen erneut auf den Strahlteiler und werden überlagert zu einem optischen Sensor weitergeleitet. Wenn die optische Weglängendifferenz beider Teilstrahlen kleiner ist als die Kohärenzlänge, interferieren die Teilstrahlen. Die Intensität der zu beobachtenden Interferenzstreifen ist dabei am größten, wenn die optischen Weglängen der beiden Teilstrahlen identisch sind. In diesem Fall hat der zugeordnete Pixel des Interferenzbildes eine maximale Intensität. Die optische Weglänge ändert sich, wenn der Messstrahl auf der Oberfläche des Messobjektes nicht auf eine plane Oberfläche trifft, sondern aufgrund von Rauheit oder Tiefenstrukturen nicht mit der gleichen optischen Weglänge reflektiert wird. In diesem Fall weist der Pixel eine niedrige Intensität auf. Über diesen Intensitätsverlauf kann für jeden Pixel eine separate Höheinformation gewonnen werden. [25]

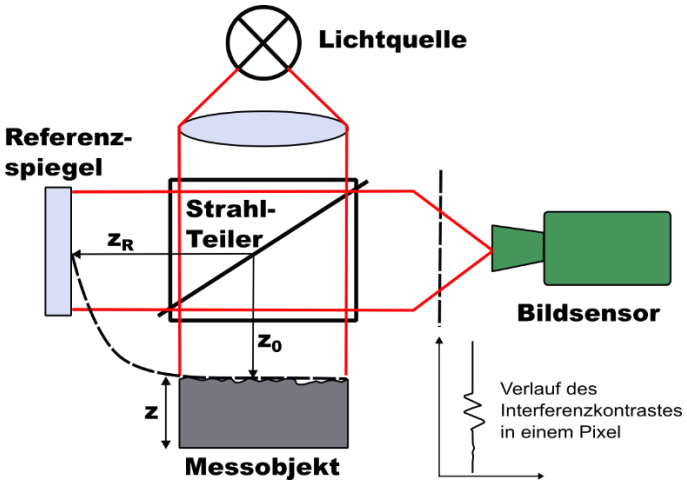



**Bild 9** Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Weißlicht-interferometers (angelehnt an [26])

Für das verwendete Gerät NewView7300 der Firma Zygo stehen Objektive mit einer Vergrößerung von 1x, 5x, 20x und 50x und einem zusätzlichen optischen Zoom mit den Faktoren 0,5x, 1x und 2x zur Verfügung. Auf diese Weise wird

eine vertikale Auflösung von maximal 0,1 nm erreicht. [27] Für viele Messungen wird ein größeres Messfeld benötigt als das WLI mit einer Messung realisieren kann. Aus diesem Grund können mit dem WLI mehrere Einzelmessfelder mit Hilfe eines Algorithmus zusammengefügt werden. Für dieses sogenannte „Stitching" ist der Messtisch verfahrbar und die Oberfläche wird automatisch an definierten Positionen vermessen. Danach werden die Einzelmessungen in einer Datenmatrix zusammengefügt. Der Überlapp der Messungen beträgt standardgemäß 25 %.

## 3.4 Statistische Versuchsplanung

Die statistische Versuchsplanung (auch Design of Experiments »DOE« genannt) ist ein Werkzeug der Statistik und dient als Überbegriff für Verfahren und Strategien zur systematischen Planung von Prozessen und Experimenten. Ziel der Versuchsplanung ist den maximalen Nutzen mit minimalem Aufwand zu erzielen und zu wiederholbaren Ergebnissen zu gelangen. Die separate Variation eines Prozessparameters während alle weiteren konstant bleiben (One-factor-at-a-time) ist die beliebteste Methode, um den Einfluss von Parametern festzulegen. Diese Methode weist aber wesentliche Nachteile auf. [28]

Im Folgenden werden die Vorzüge der statistischen Versuchsplanung anhand eines Beispiels dargestellt. Beim Laserpolieren wird der Einfluss der Parameter Laserleistung $P_L$ und Scangeschwindigkeit $v_{scan}$ auf die Oberflächenrauheit untersucht. Hierzu werden die Parameter $P_L$-1, $P_L$-2, $v_{scan}$ -1 und $v_{scan}$ -2 verwendet. Geht man davon aus, dass ein Unterschied von zwei Standardabweichungen erkannt werden soll, sind pro Variante acht Einzelversuche notwendig. [28]

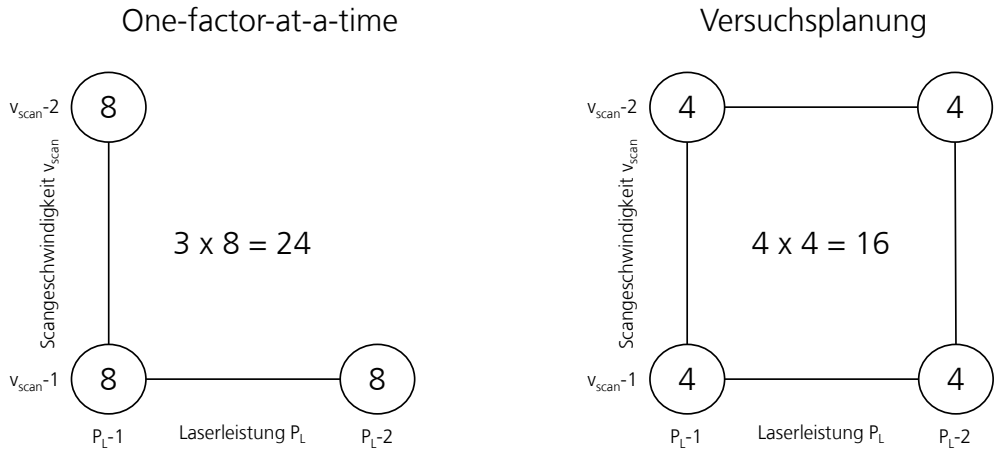



**Bild 10** Vergleich der One-factor-at-a-time Planung mit teilfaktorieller Versuchsplanung am Beispiel vom Laserpolieren mit den Prozessparametern Scangeschwindigkeit und Laserleistung (angelehnt an [28])

Die One-factor-at-a-time Variante ist in Bild 10 auf der linken Seite dargestellt. Sie erreicht eine Gesamtanzahl von 24 Einzelversuchen. Mit jedem zusätzlich untersuchten Faktor nimmt die Anzahl der Einzelversuche um acht zu. Eine

Information über die Oberflächenrauheit bei der Kombination aus $P_L$-2 und $v_{scan}$-2 ergibt sich bei dieser Versuchsplanung nicht. Auf der rechten Seite in Bild 10 ist dagegen ein Versuchsplan nach einem teilfaktoriellen Versuchsplanung dargestellt. Hier werden mehrere Parameter gleichzeitig variiert, wobei jeweils vier Einzelversuche pro Prozessvariante durchgeführt werden. Die Gesamtanzahl der Einzelversuche beträgt 16. Obwohl weniger Einzelversuche pro Variation durchgeführt werden, existieren wie bei der ersten Variante acht Einzelversuche zur Variation der Laserleistung. Zusätzlich wird die Variation der Scangeschwindigkeit ebenfalls mit acht Einzelversuchen untersucht. Dieses Beispiel zeigt, dass sich mit einer geringeren Anzahl an Versuchen mehr Informationen herausziehen lassen. Der Aufwand der Experimente wird hierbei auf zwei Drittel reduziert. [28]

Die statistische Versuchsplanung wird hauptsächlich in drei verschiedene Methoden unterteilt: die klassische Methode, die Methode nach G. Taguchi und die Methode nach D. Shainin. Die klassische Versuchsplanung bietet sich vor allem zur Erfassung der Abhängigkeit der Zielgröße von verschiedenen Einflussgrößen an, um das Prozessverständnis allgemein zu verbessern. Die Methoden nach G. Taguchi gehen bereits tiefer in die Optimierung von Prozessen und finden ihre Anwendung in der Analyse der Störgrößen. Das Hauptziel bei der Verwendung der Taguchi-Methode ist die Abhängigkeit der Zielgröße von Störgrößen möglichst minimal zu halten, sodass das Prozessergebnis möglichst unabhängig von z.B. Schwankungen der Prozessparameter, Umgebungs-bedingungen oder des Ausgangsmaterials ist. Voraussetzung bei der Methode nach Taguchi ist, dass sich die Störgrößen innerhalb des Versuchsplans variieren lassen. Bei der Methode nach D. Shainin wiederum liegen die Hauptaugenmerkmale auf der Streuung der Zielgröße und die Ermittlung der wichtigsten Größen, die die Streuung beeinflussen. In allen drei Methoden der statistischen Versuchsplanung werden feste Begriffe verwendet, die in Tabelle 2 zum Verständnis erläutert werden. [28]

**Tabelle 2** Übersicht der Begriffe in der statistischen Versuchsplanung [28]

| Begriff | Erläuterung | Beispiel |
|---|---|---|
| Zielgrößen | Ausgangsgröße des Versuchs. Die Zielgröße kann sowohl messbar sein oder sich aus mehreren anderen Messgrößen berechnen lassen | Oberflächenrauheit |
| Einflussgrößen | Einflussgrößen können die Zielgröße beeinflussen. Sie setzen sich aus Steuer- und Störgrößen zusammen | |
| Steuergrößen | Einflussgrößen, deren Wert zum Erhalt einer bestimmten Zielgröße eingestellt werden und dort gehalten werden kann | Scangeschwindigkeit |
| Störgrößen | Einflussgrößen, deren Wert nicht vorgegeben werden kann | Umgebungstemperatur |
| Faktoren | Für den Versuchsplan ausgewählte Einflussgrößen | |
| Faktorstufen | Auswahl der Werte der Faktoren für den Versuchsplan. Jeder eingestellte Wert wird als Stufe bezeichnet | |
| Quantitative Faktoren | Quantitative (numerische) Faktoren werden in Stufen mit auf einer Messskala beschreibbaren Werten angegeben | Scangeschwindigkeit |
| Qualitative Faktoren | Bei qualitativen (kategorischen) Faktoren existiert keine Messskala. Sie beschreiben Namen, Beschreibungen, Bezeichnungen oder Zustände | Proben getrocknet: Ja / Nein |

Der Arbeitsablauf der statistischen Versuchsplanung ist in Bild 11 dargestellt. Das Vorgehen zur Durchführung der experimentellen Versuchsreihen in dieser Dissertation wurde an diesen Punkten angelehnt.

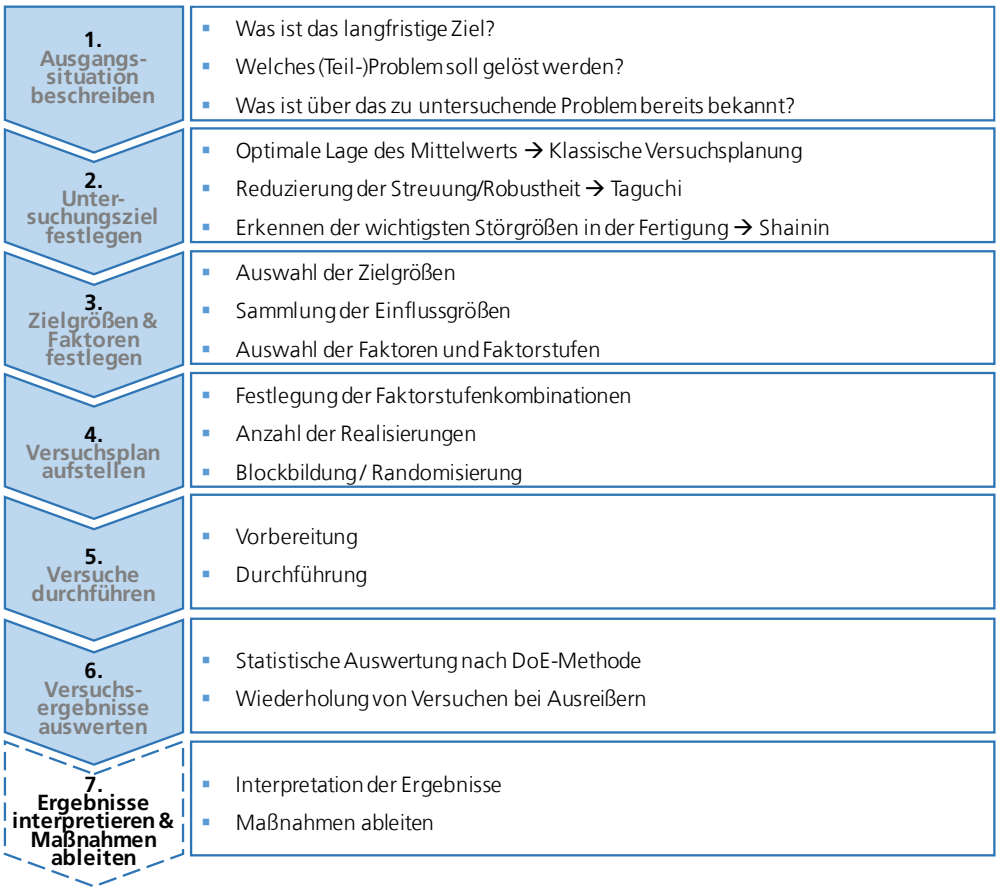



**Bild 11** Übersicht des Vorgehens bei der statistischen Versuchsplanung [28]

## 3.5 PID-Regler

Im Rahmen der folgenden Versuche wird eine Temperaturregelung auf Grundlage eines Proportional-Integral-Differential-Reglers (PID-Regler) verwendet.

Der PID-Regler wird in der Regelungstechnik dazu verwendet, eine Festwertregelung durchzuführen. Hierbei wird das Eingangssignal u(t) erfasst und durch den Regler auf das gewünschte Ausgangssignal v(t) angepasst. Der Regler setzt sich aus drei Gliedern eines linearen zeitinvarianten Systems (LZI-Gliedern) zusammen und ermöglicht eine zuverlässige Regelung sowohl analog als auch digital. Das erste Glied des Reglers ist der Proportionalanteil (P), welcher mit dem mathematischen Modell in Formel 3.4 beschrieben wird. Der Regelparameter $K_P$ wird als Proportionalwert bezeichnet. Der P-Regler bestimmt im Wesentlichen die Geschwindigkeit, mit der die Eingangsgröße auf die Ausgangsgröße reguliert wird. Da die Übertragungsfunktion nur einen Proportionalfaktor einbringt, entsteht stets eine bleibende Regelabweichung. [29]

**3.4**

$$v(t) = K_P u(t)$$

Das zweite Glied im PID-Regler ist der Integralanteil, der mit dem Model aus Formel 3.5 beschrieben wird. $K_I$ bezeichnet hierbei den Integrierbeiwert. Der I-Regler korrigiert die beim P-Regler verbleibende Regelabweichung und berücksichtigt außerdem zeitlich zurückliegende Messwerte von u(t). Bei dem P-Regler existiert am Anfang der Sprungantwort stets ein Überschwinger, der durch den I-Anteil reduziert werden kann und so eine Übersteuerung verhindert. [29]

**3.5**

$$v(t) = K_I \int_0^t u(t)dt$$

Das Differentialglied, das den letzten Teil des PID-Reglers ausmacht, wird mit der Formel 3.6 beschrieben, wobei $K_D$ den Differenzierbeiwert beschreibt. Der Differentialanteil korrigiert die Ausregelung von Schwankungen bei der Einhaltung des Zielwertes. [29]

**3.6**

$$v(t) = K_D \dot{u}(t)$$

Die zusammengesetzte Übertragungsfunktion ist die Summe der einzelnen Regelungsglieder und ist in Formel 3.7 beschrieben. [29]

**3.7**

$$v(t) = K_P u(t) + K_I \int_0^t u(t)dt + K_D \dot{u}(t)$$

Bei einem optimal eingestellten PID-Regler kann mit einer geringen Anregelzeit und minimalem Überschwingen eine zuverlässige Regelung eingestellt werden. [29]

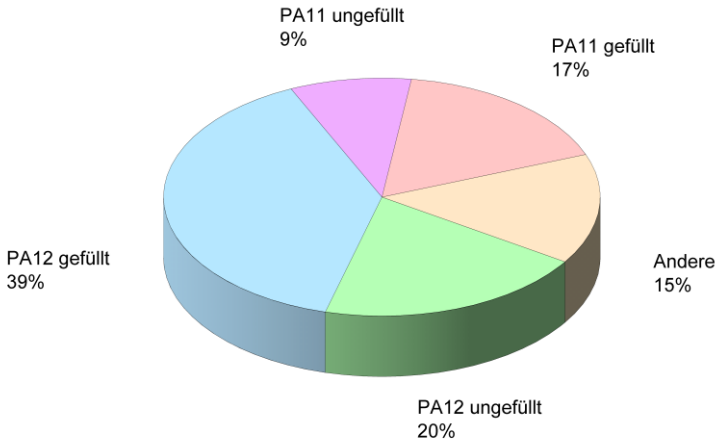
# 4 Experimentelle Grundlagen

## 4.1 Probenmaterial Polyamid

Polyamid (PA) ist ein synthetischer thermoplastischer Kunststoff aus dem z.B. Kunstfasern hergestellt werden. Der teilkristalline Kunststoff zeichnet sich durch gute mechanische Eigenschaften aus, da er formstabil ist und eine hohe Festigkeit, Steifigkeit und Härte aufweist. Er hat einen hohen Verschleißwiderstand und gute Beständigkeit gegen Löse- und Schmiermittel. Zudem ist er gesundheitlich unbedenklich. Die mechanischen Eigenschaften von PA hängen stark vom Feuchtigkeitsgehalt des Materials ab, der sich durch eine geeignete Auswahl der PA-Art beeinflussen lässt. [30]

Beim SLS-Druck werden hauptsächlich Polyamide als Verarbeitungsmaterial verwendet. PA11 und PA12 sind hierbei die häufigsten verwendeten Materialien. In Bild 12 ist eine Übersicht über die für den europäischen Markt produzierten Polymerklassen gezeigt. Hier wird bereits deutlich, dass rund 85 % auf PA12 basieren. In Betrachtung der tatsächlich verwendeten Materialien für das SLS-Drucken beträgt die Nutzung von PA12 über 92%. Die 15 % als „andere" bezeichneten Werkstoffe basieren auf Pulvern aus TPE, PU, PP, PA6, PE und PEEK. [10]

**Bild 12** Anteil der produzierten SLS-Pulver für den europäischen Markt nach Polymerklassen [angelehnt an [10]]



Diese Übersicht zeigt, dass gerade Polyamid 12 für den SLS-Druck etabliert ist. Da die meisten Bauteile aus PA12 gefertigt sind, ist auch die Nachbearbeitung dieses Materials von großer Bedeutung, sodass auch die Durchführbarkeit des Laserpolieren von PA12 von großem Interesse ist.

### 4.1.1 Vergleich mit anderen Kunststoffen

Verschiedene Polymere wurden beim Laserpolieren bereits verwendet. Allerdings ist das Ergebnis hinsichtlich der Machbarkeit und des Erfolgs sehr unterschiedlich ausgefallen. Dies zeigt vor allem die Studie mit verschiedenen Kunststoffen von M. Layher et al. [17]. Im Folgenden werden in Tabelle 3 physikalisch-thermische Eigenschaften verschiedener Kunststoffe unter Normalbedingungen verglichen. Die Literaturwerte für Kunststoffe weisen eine große Bandbreite auf, sodass nur Werte aus einer Quelle dargestellt sind, um eine Vergleichbarkeit herzustellen.

Aus der Gegenüberstellung der thermophysikalischen Eigenschaften der Kunststoffe in Tabelle 3 ist keine Information zu erkennen, die auf die Eignung zum Laserpolieren schließen lässt. Die Dichte der gezeigten Polymere befindet sich in einem Bereich von 0,9 – 2,23 g/cm³. Die spezifische Wärmekapazität variiert von 1,0 – 3,4 kJ/kgK und die Wärmeleitfähigkeit von 0,15 – 0,33 W/mK. Ein größerer Unterschied ist bei dem linearen Ausdehnungskoeffizienten zu erkennen. Dieser variiert von 80 bis 250 $K^{-1} \cdot 10^{6}$. [31] Allerdings wurden PLA mit dem geringsten Wert und PE mit dem höchsten Wert beide als durchaus gut geeignet zum Laserpolieren bewertet. ABS, welches als schlecht bzw. nicht polierbar bewertet wird, hat eine mittlere lineare Ausdehnung. Daher scheint diese Stoffeigenschaft keinen direkten Aufschluss über die Laserpolierbarkeit der Kunststoffe zu geben.

Eine direkte Übertragbarkeit der bisherigen Erfahrungen auf einen neuen Kunststoff ist laut bisherigen Erkenntnissen nicht allein aufgrund der thermophysikalischen Eigenschaften möglich, sodass für neue Kunststoffe die Machbarkeit erneut getestet werden muss.

**Tabelle 3**
Gegenüberstellung der physikalisch-thermischen Eigenschaften der bisher laut Literatur laserpolierten thermoplastischen Kunststoffe [31]

Bearbeitbarkeit mittels Laserpolieren laut Literatur:
√ Erfolgreich
o Mittel
x Nicht erfolgreich

| Kunststoff | Dichte [g/cm³] | Glasübergangs-temperatur [°C] | Schmelz-temperatur [°C] | Zersetzungs-temperatur [°C] | Linearer Ausdehnungs-koeffizient [$K^{-1}*10^6$] | Wärmekapazität [kJ/kgK] | Wärmeleitfähig-keit [W/mK] | Kristallinität | Bearbeitbarkeit laut Literatur |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PA12 | 1,01 – 1,04 | 40 – 50 | 170 – 180 | 465 – 475 | 120 – 140 | 1,17 – 1,26 | 0,22 – 0,24 | Teilkristallin | √ [19] |
| PA6 | 1,12 – 1,15 | 45 – 80 | 225 – 235 | 445 – 460 | 80 – 90 | 1,59 – 1,7 | 0,22 – 0,33 | Teilkristallin | X [17] |
| PC | 1,20 – 1,24 | 70 – 85 | 245 – 260 | 425 – 445 | 80 – 100 | 1,04 – 1,17 | 0,24 | Amorph | √ [13, 17] |
| ABS | 1,03 – 1,07 | 95 – 105 | - | 420 – 425 | 80 – 100 | 1,26 – 1,68 | 0,15 – 0,2 | Amorph | X [15, 17, 18] |
| PLA | 1,21 – 1,43 | 45 – 65 | 150 – 160 | 350 – 375 | - | - | - | Unter-schiedlich | √ [17] |
| PMMA | 1,15 – 1,19 | 45 – 115 | - | 360 – 390 | 90 – 110 | 1,45 – 1,47 | 0,16 – 0,25 | Amorph | √ [17] |
| PE | 0,91 – 0,93 | -30 – - 10 | 100 – 115 | 475 – 490 | 230 – 250 | 1,8 – 3,4 | 0,3 – 0,34 | Teilkristallin | √ [17] |
| PP | 0,9 – 0,91 | -20 – 20 | 160 – 165 | 450 – 470 | 130 – 190 | 2,0 | 0,17 – 0,25 | Teilkristallin | X [17] |
| PTFE | 2,13 – 2,23 | 120 – 130 | 325 – 330 | 575 – 590 | 100 – 150 | - | 0,23 – 0,25 | Teilkristallin | 0 [16] |

### 4.1.2 Additiv gefertigte Proben

Als Probenmaterial werden additiv gefertigte Proben aus Polyamid 12 verwendet, die mit einem SLS-Verfahren hergestellt wurden. Im Nachfolgeprozess wurden die Proben sandgestrahlt, um die Oberfläche zu reinigen. Die quadratischen Proben haben eine Kantenlänge von 30 mm und eine Dicke von 5 mm. Die Ausgangsflächenrauheit wurde über acht Proben gemittelt und ist in Bild 13 für verschiedene Ortswellenlängen $\Lambda$ aufgetragen. Die angegebenen Ortswellenlängen entsprechen denen der Profilfilter, welche zur Rauheitsberechnung, entsprechend Kapitel 3.3, verwendet wurden. Da die Fehlerabweichungen gering sind, wird der Mittelwert als Ausgangsrauheit konstant verwendet. Laserpoliert werden die Proben für verschiedene

Ortswellenlängenbereiche zwischen 6,25 – 1600 µm. In dem Rauheitsprofil der additiv gefertigten Proben ist zu sehen, dass die Oberflächenrauheit Sa im höchsten betrachteten Ortswellenlängenbereich um ca. einen Faktor 10 höher ist als im niedrigsten Ortswellenlängenbereich.

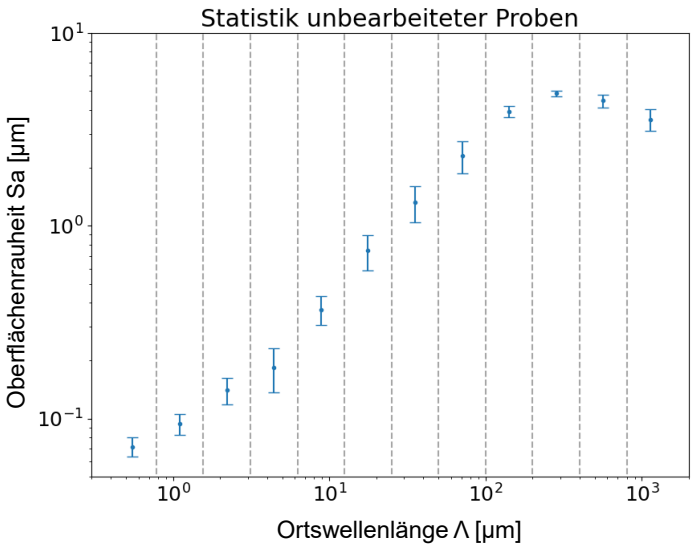



**Bild 13**
Ausgangsrauheit SLS-gefertigter Proben aus Polyamid 12 für verschiedene Ortswellenlängen. Der Mittelwert und die Standardabweichung wurden aus acht Proben ermittelt.

### 4.1.3 Emissionsgrad des Probenmaterials

Der Emissionsgrad ist eine wichtige Stoffeigenschaft bei der Verwendung von Infrarotwärmemessgeräten. Der ideale schwarze Strahler hat einen Emissionsgrad $\varepsilon = 1$ und emittiert damit ein Maximum an Wärmestrahlung. Reale Materialien weichen von diesem Ideal ab und haben Werte von $\varepsilon < 1$, sodass die abgegebene Wärmestrahlung bei gleicher Temperatur geringer ist. Eine Messung der Wärmestrahlung, ohne die Einstellung des korrekten Emissionsgrades, würde also eine verfälschte Temperatur ergeben. Aus diesem Grund muss der Emissionsgrad des zu vermessenden Materials bekannt sein. Eine Schwierigkeit bei der Festlegung des Emissionsgrades ist, dass dieser wellenlängen- und somit temperaturabhängig ist und daher für jede Temperatur nachgestellt werden müsste. Außerdem lässt sich der Emissionsgrad gerade bei zähflüssigen Materialen nur schwer bestimmen, da sich das Emissionsverhalten in der flüssigen und festen Phase unterscheiden kann.

Der Emissionsgrad von Polyamid 12 wird in der Literatur nicht eindeutig festgelegt. Die Literaturwerte liegen bei $\varepsilon = 0{,}8$ [32] und $\varepsilon = 0{,}95$ [18] für das Grundmaterial von PA12. Für SLS-gedruckte Bauteile kann sich dieser Wert unterscheiden, da durch die erhöhte Temperatur bereits Strukturänderungen stattgefunden haben können. K. Braun hat durch Vermessungen des SLS-gedruckten PA12 mit dem Spektrometer einen Emissionsgrad von $\varepsilon = 0{,}95$ bei Raumtemperatur an der Oberfläche ermittelt. [18] Da der Emissionsgrad

allerdings sowohl stark vom Aggregatszustand, der Eindringtiefe im Material, der Temperatur sowie der Struktur selbst abhängig ist, kann dieser Wert nicht als zuverlässig angesehen werden, um absolute Temperaturen während des Prozesses angeben zu können.

## 4.2 Verwendetes Laser-Setup

### 4.2.1 Laserstrahlquelle

Im folgenden Versuchsaufbau wird die Laserstrahlquelle „Microstorm™ 300“ der Firma FEHA LaserTec GmbH verwendet. Die Strahlquelle ist ein $CO_2$-Laser mit einer Wellenlänge von 10,6 µm und einer maximalen Laserleistung von 300 W. Die Laserquelle wurde ausgewählt, da die Absorptionseigenschaften von Kunststoffen bei 10,6 µm eine oberflächennahe Aufschmelzung ermöglichen. Die Strahlquelle kann sowohl im kontinuierlichen Modus (CW) als auch gepulst betrieben werden. Die Repetitionsrate im Pulsbetrieb beträgt 150 kHz und die Pulsdauer 300 ns. Die detaillierten technischen Daten der Laserstrahlquelle sind im technischen Datenblatt zu finden. [33]

### 4.2.2 Versuchsaufbau

Die in Kapitel 4.2.1 beschriebene Laserstrahlquelle wird mit einem Scanner des Typs „intelliScan20“ der ScanLab GmbH kombiniert [34]. Die $CO_2$-Laserstrahlung wird durch den Scanner geleitet und anschließend durch eine F-Theta-Linse mit einer Brennweite von f = 200 mm auf den darunterliegenden Probentisch fokussiert. Die Laserleistung wird mit einem akustooptischen Modulator (AOM) gesteuert. Der AOM ist ein optisches Bauelement, das den Laserstrahl mit Hilfe eines optischen Gitters beugen kann. Dies ermöglicht mit Hilfe einer Steuerspannung von 1-10 V, die ausgegebene Laserleistung zu regulieren.

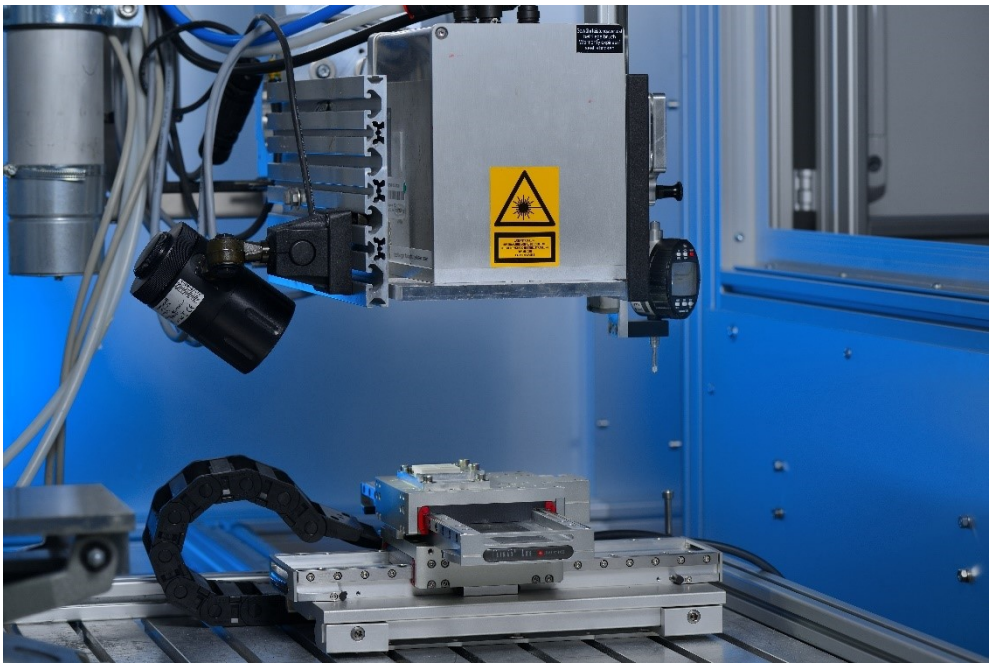


**Bild 14** Laboraufbau zum Laserpolieren von Kunststoffen mit X-Y-Z-Achssystem, Scannereinheit und Linearachse

Das Setup enthält ein Achssystem von Rexroth mit drei Freiheitsgraden (X,Y,Z). Dieses dient zur Justage des Probentisches in X- und Y-Richtung sowie zur Justage des Arbeitsabstands zwischen der F-Theta-Linse und der Probenoberfläche in Z-Richtung. Zur Justage des Arbeitsabstands ist außerdem eine digitale Messuhr angebracht, mit der der Fokusabstand eingestellt werden kann. Der Fokusabstand wurde vorher durch eine Vermessung der Kaustik ermittelt.

Zur Verwendung einer ortsaufgelösten Temperaturregelung muss der Pyrometermessfleck sich stets in der mit dem Laser bestrahlten Zone befinden. Der Laserscanner wird hierzu in Nullposition verwendet, da der Scanner bei einer nicht koaxialen Verwendung des Pyrometers nicht verwendet werden kann, um eine ortsaufgelöste Temperaturregelung zu realisieren. Daher wird das Pyrometer in einem möglichst steilen Winkel neben der Laseroptik angebracht und auf den Laserspot ausgerichtet. Zur Bewegung der Probe unter dem Laserstrahl wurde eine zusätzliche Linearachse (VA LINAX Lsx 200F60) installiert von JennyScience. Auf diese Weise bleiben der Laserspot und der Messfleck des Pyrometers stets aufeinander, während die Probe bewegt wird. Die zusätzliche Linearachse ermöglicht eine schnellere und störungsfreiere Bewegung des Systems als den gesamten Aufbau zu verfahren.

Alternativ ist eine koaxiale Integration des Pyrometers in den Laserstrahlengang denkbar. In diesem Fall wird die von der Oberfläche reflektierte thermische Strahlung durch den gleichen optischen Pfad geleitet. Durch einen Spiegel, der

für die thermische Strahlung transmissiv ist und die Laserstrahlung reflektiert, wird die Temperaturstrahlung zum Pyrometer geleitet. Diese Methode erfordert allerdings ein kompliziertes optisches System, das gegebenenfalls Verluste der Intensität zur Folge hat. Um die Temperaturregelung einfach und ohne zusätzlich erzeugte Messungenauigkeiten zu integrieren, wurde auf diese Methode verzichtet.

### 4.2.3 Temperaturregelung

Die Temperaturregelung wird über eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) der Beckhoff GmbH realisiert. Die Temperatur im Prozess wird über das Pyrometer Pyrospot DPE10M der Dias Infrared Systems GmbH aufgenommen und durch die SPS in ein digitales Signal umgewandelt. Die SPS verarbeitet das Signal mit einem PID-Regler und wandelt das digitale Signal in eine Spannung um, die an den AOM des Lasers weitergegeben wird, sodass die Laserleistung angepasst wird.

Die größte Problematik stellt die Messfrequenz des Pyrometers dar. Das verwendete Pyrometer hat eine minimale Einstellzeit von 1 ms entsprechend einer Messfrequenz von 1 kHz. Die geringste Geschwindigkeit, mit der die Probe in der ersten Versuchsreihe verfahren wird, beträgt 50 mm/s, sodass hier bereits nur 200 Messpunkte pro Bahn mit 10 mm Länge aufgenommen werden können. Bei der schnellsten Geschwindigkeit von 1000 mm/s werden nur noch zehn Messwerte aufgenommen, sodass eine zuverlässige Auswertung nicht möglich ist. Schnellere Pyrometer in dem benötigten Wellenlängenbereich sind zu diesem Zeitpunkt nicht erhältlich, sodass hier keine Alternative besteht. Für die Regelung bedeutet dies, dass diese sehr stabil und das Einschwingverhalten sehr kurz sein muss. Die maximale Bearbeitungsgeschwindigkeit muss auf den Regler angepasst werden.

Die Reglereinstellungen werden experimentell in Vorversuchen bestimmt. Zunächst wurde ein einfacher PID-Regler eingesetzt. Die Antwort der Steuerspannung an den Laser des PID-Reglers ist in Bild 15 (a) in blau dargestellt und die gemessene Prozesstemperatur in orange. Die Temperatur nimmt nach jeder polierten Spur stark ab, da unidirektional bearbeitet wird. D.h. eine Bahn wird mit eingeschaltetem Laser bearbeitet, die Achse fährt ohne Lasersignal zurück und beginnt dann die nächste Spur. Der PID-Regler wertet nur die Spannung aus, wenn das Lasersignal eingeschaltet ist, sodass die Abkühlung während der Rückfahrten nicht einberechnet wird. In der Sprungantwort des PID-Reglers ist eine starke Überschwingung zu erkennen und die Einschwingung auf den gewünschten Wert ist mit einer Zeit von knapp drei Sekunden zu langsam, da in dieser Zeit bereits die Hälfte einer Spur poliert wurde, bis die optimale Temperatur erreicht wird. Bei der Betrachtung einer einzelnen Spur, wie sie rechts im Bild im Ausschnitt zu erkennen ist, ist eine geeignete Einschwingung zu erkennen. Die Prozesstemperatur schwankt hierbei nur um ca. 5 °C. Um die

Einschwingzeit des PID-Reglers zu reduzieren wurde der Integralanteil auf null gesetzt. Durch den I-Anteil wird Geschwindigkeit eingebüßt, um das Ergebnis qualitativ zu verbessern. Dies ist in Bild 15 (b) deutlich zu erkennen. Die Sprungantwort ist wesentlich kürzer, sodass bereits nach weniger als 0,5 Sekunden die Einschwingung stattgefunden hat. Allerdings steigt die Temperaturschwankung auf etwa 20 °C an, was bei der Kunststoffbearbeitung nicht tolerierbar ist.

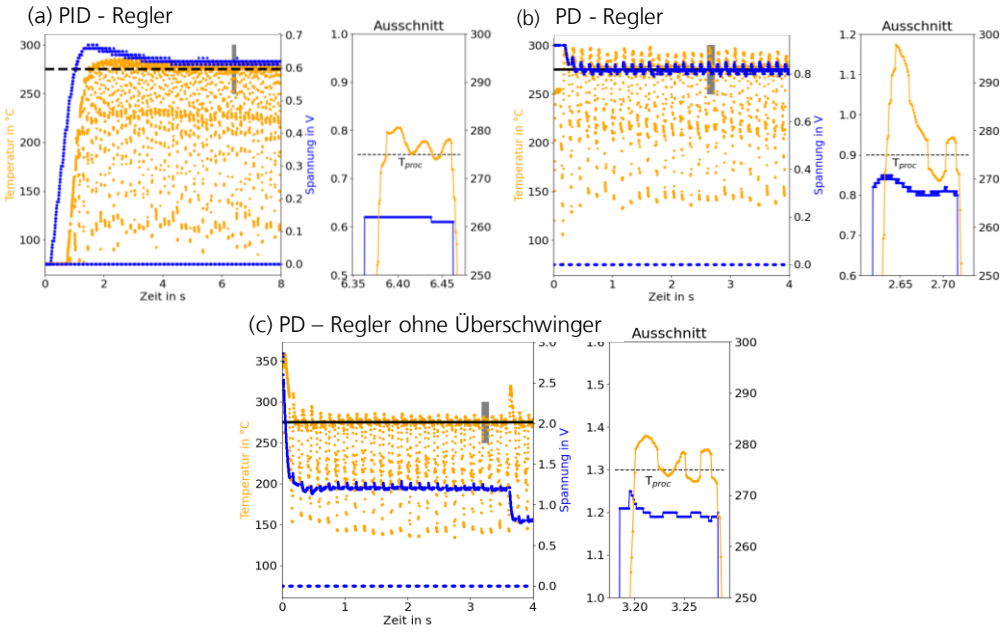



**Bild 15** Einstellung des PID-Reglers zur Temperaturregelung des Laserpolierprozesses

Blau: Steuerspannung [V]
Orange: Gemessene Prozess-temperatur [°C]

Aus diesem Grund wurde der PD-Regler modifiziert, indem der Überschwinger aus der Sprungantwort rausgerechnet wird. Hierzu wird nach der ersten Spur die Endtemperatur gespeichert und für die ersten zehn Werte der nächsten Spur wiederverwendet. Auf diese Weise kann die neue Spur sich aufwärmen und die Regelung schwingt sich mit gleichbleibender Genauigkeit schneller ein. Dieses Verhalten ist in Bild 15 (c) zu erkennen. Die modifizierte Regelung weist die Einschwingzeit des PD-Reglers und die Genauigkeit des PID-Reglers auf und die jeweiligen Nachteile wurden eliminiert.

Die Regelung wurde für verschiedene Scangeschwindigkeiten getestet, um die maximal verwendbare Scangeschwindigkeit zu definieren, bei der eine Regelung noch zuverlässig möglich ist. Diese liegt bei $v_{scan}$ = 600 mm/s.

Im weiteren Verlauf wird bei den experimentellen Versuchsreihen die Zieltemperatur als Prozessparameter aufgeführt. Hierbei ist der Unterschied zwischen den verschiedenen Temperaturen zu beachten. Unterschieden werden die Zieltemperatur, die gemessene Temperatur und die reale Temperatur. Die

reale Temperatur ist jene, die real auf der Oberfläche vorliegt. Die gemessene Temperatur ist die durch das Pyrometer erfasste Temperatur. Das Pyrometer hat eine Messunsicherheit von ca. 2 K, die für kleine Messabweichungen sorgt. Eine weitere Messabweichung ist dem Emissionsgrad geschuldet. Der wahre Emissionsgrad des Kunststoffs ist nicht bekannt und unterscheidet sich nicht nur durch die Struktur und die Eigenschaften des Polymers, sondern auch durch die Phase, sodass beim Phasenübergang ein Sprung entstehen kann. Einfachheitshalber wurde daher ein Emissionsgrad von $\varepsilon = 1$ am Pyrometer eingestellt, da zur Regelung des Prozesses nur relative Temperaturwerte verwendet werden. Wichtig ist hierbei, dass das Verhältnis der Werte untereinander das gleiche ist. Der Zielwert ist der an der Regelung eingestellte Wert und bezieht sich dementsprechend auch auf die vom Pyrometer gemessenen Daten. Für die Angabe absoluter Temperaturwerte ist aus diesem Grund die Unterscheidung der Zieltemperatur und der realen Temperatur von großer Bedeutung, die stets für den gewählten Emissionsgrad gilt.

# 5 Aufstellung der Forschungshypothese

Das Laserpolieren von Kunststoffen ist nicht ansatzweise so ausgiebig untersucht worden wie für Metalle oder Gläser. Trotzdem wurden schon einige Untersuchungen an verschiedenen Kunststoffen durchgeführt. Allerdings ließ sich aus den Arbeiten kein eindeutiger Parameter als ausschlaggebende Einflussgröße ableiten. Laut T. Grumpenberger et al. [16] ist die Temperatur weitestgehend verantwortlich für das Polierergebnis, laut Yuan Chai et al. [15] der Spurabstand und die Scangeschwindigkeit und laut A. Richmann [13] und M. Layher et al. [17] die Wechselwirkungszeit und die Anzahl der Mehrfachüberfahrten. Die Untersuchungen wurden mit verschiedenen Kunststoffen, unterschiedlichen Verfahren und verschiedenen Parametersätzen durchgeführt. Alle diese Prozessparameter, die als Haupteinflussgrößen beschrieben wurden, haben einen direkten Einfluss auf die Ausbildung des Schmelzbads. Dieser Zusammenhang wurde bisher noch nicht erklärt oder gedeutet und wird in der vorliegenden Arbeit aufgenommen. Außerdem wurde bisher keine detaillierte Einflussanalyse durchgeführt, wie groß der Einfluss der einzelnen Prozessparameter auf die Qualität des Poliervorgangs ist.

In Bild 16 ist die Kombination verschiedener Einflussgrößen auf das Laserpolieren gezeigt. Das Laserpolierergebnis hängt ausschlaggebend von den Gradienten der der Viskosität und der Oberflächenspannung ab. Diese wiederum stehen in direktem Zusammenhang mit dem Gradienten der Temperatur im Schmelzbereich und dessen direkter Umgebung.

Durch die Laserstrahlung entsteht ein Schmelzbad, das mittig an der Oberfläche die größte Temperatur aufweist. Durch die Verwendung eines Gauß-Strahls entstehen beim Laserpolieren unterschiedliche Intensitätsbereiche und damit unterschiedliche ortsabhängige Temperaturen. In Richtung der unteren Schichten sowie mit größerer Entfernung von der Mitte des Prozesses nimmt der Temperaturgradient ab. Mit steigender Temperatur zum Bearbeitungszentrum nimmt der Viskositätsgradient ab, sodass die Fließfähigkeit des Materials sich verbessert. Gleichzeitig nimmt der Gradient der Oberflächenspannung ab, sodass die Oberflächenspannung zur Mitte des Schmelzbads schwächer wird. Durch die zunehmende Verflüssigung des Materials durch die niedrige Viskosität wird das Glättungspotenzial durch das Laserpolieren zunächst verbessert. Die abnehmende Oberflächenspannung kann aber dazu führen, dass die Glättungskraft keinen geeigneten Angriffspunkt mehr erhält, wenn das Material zu viskos wird. Entscheidend ist ein daher das richtige Verhältnis aus Viskosität und Oberflächenspannung.

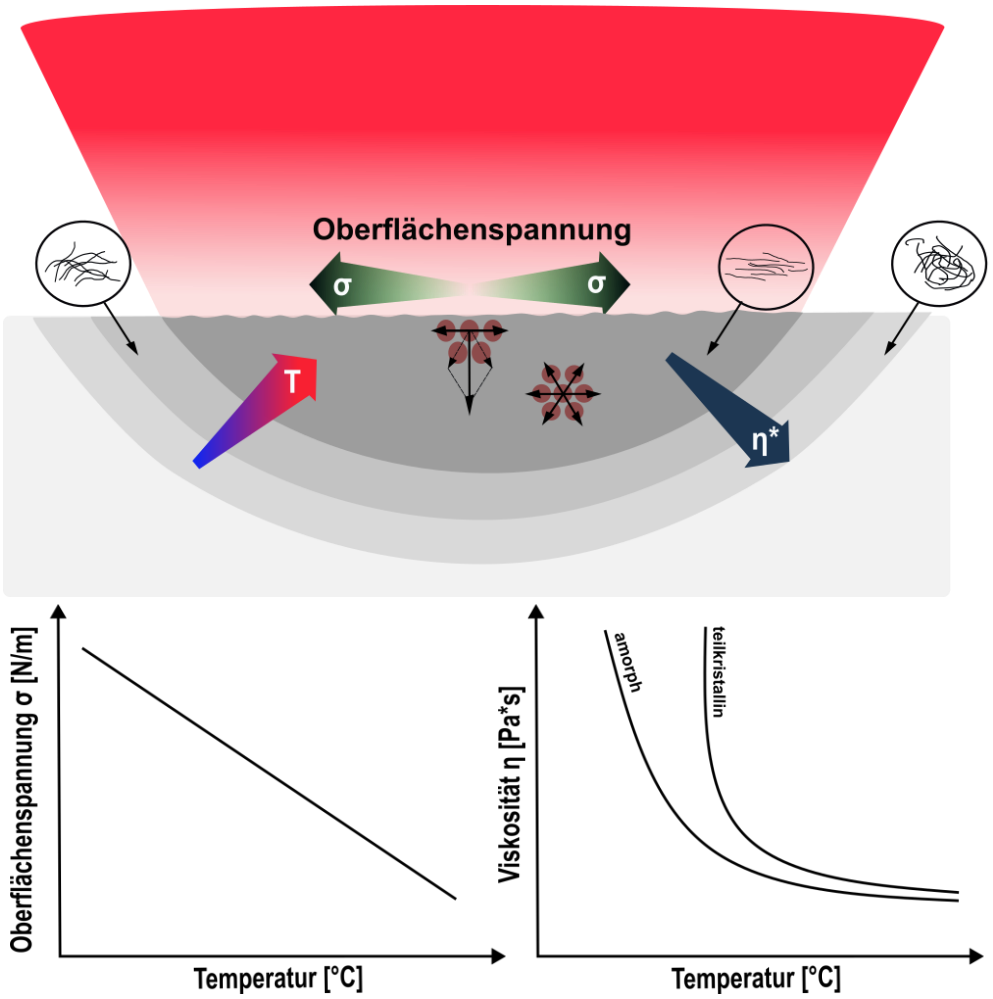



**Bild 16**
Schematische Darstellung der Viskosität und Oberflächen-spannung beim Laserpolieren von Kunststoffen [7, 35]

Die Temperaturabhängigkeit der Nullviskosität ist in Formel 5.1 beschrieben. Die Nullviskosität ist eine theoretische Angabe der Viskosität eines Fluids unter der Voraussetzung, dass vernachlässigbar kleine Scherkräfte wirken. [7].

**5.1**

$$\eta_0\,(T) = D_1 \cdot e^{\left|\frac{-A_1 \cdot (T - T^*)}{A_2 + (T - T^*)}\right|}$$

*D1: Nullviskosität bei Glastemperatur des Stoffes*
*A1,2: Stoffkonstanten zur Temperaturabhängigkeit des Stoffes*
*T*: Druckabhängige Glastemperatur des Stoffes*

Die Viskosität wird mit steigender Temperatur, also zur Oberfläche und zur Mitte des Laserstrahls hin, geringer und im Material entstehen Bereiche unterschiedlicher Viskosität. Das Senken der Viskosität im Schmelzbereich hat zur Folge, dass die Polymerketten sich aus ihrem ungeordneten Zustand in einen

geordneten Zustand begeben, sodass die Ketten leichter aneinander vorbeigleiten können. Die Schmelze lässt sich somit leichter bewegen und kann durch die wirkende Kraft der Oberflächenspannung besser geglättet werden. Um den Bereich maximaler Intensität herum nimmt die Temperatur allerdings ab, sodass das Material sich zwar in der schmelzflüssigen Phase befindet, die Viskosität des Materials sich aber von jener im Zentrum des Prozesses unterscheidet.

**5.2**

$$\sigma_M(T) = k_\sigma \cdot (T_k' - T)$$

*$k_\sigma$: Negativer Temperaturkoeffizient von $\sigma_M$ ($k_\sigma = -\delta\sigma_M/\delta T$)*
*$T_K'$: Temperatur ca. 6 K unter der kritischen Temperatur*

In Formel 5.2 [36] ist die Temperaturabhängigkeit der molaren Oberflächenspannung nach Eötvös beschrieben. Die molare Oberflächenspannung ist die molar normierte Oberflächenspannung, die verwendet werden kann, um verschiedene Flüssigkeiten miteinander zu vergleichen. Der negative Temperaturkoeffizient beträgt für Flüssigkeiten in der Regel ca. 0,21 µJ/K. Für Kunststoffschmelzen kann dieser Wert abweichen. [36] Die Oberflächenspannung nimmt mit steigender Temperatur ebenfalls ab, sodass die Kräfte bei steigenden Temperaturen nicht mehr ausreichen könnten, um die Oberfläche zu glätten. Das Resultat ist eine rauere Oberfläche.

Zu erwarten ist beim Laserpolieren daher, dass eine optimale Temperatur existiert, die zu einem geeigneten Verhältnis führt zwischen antreibender Kraft (Oberflächenspannung) und dämpfender Kraft (Viskosität). Diese Hypothese soll im Rahmen der Dissertation untersucht werden. Hierbei sind zum einen die Randbedingungen festzulegen, die bei der Kombination verschiedener Prozess- und Werkstoffparameter für eine hohe Rauheitsreduktion zu beachten sind. Zum anderen sollen die Prozessparameter identifiziert werden, die den größten Einfluss auf die Polierfähigkeit beim Laserpolieren von additiv gefertigten Kunststoffproben haben. Untersucht werden hierbei die Parameter, die einen direkten Einfluss auf die lateralen und vertikalen Dimensionen des Schmelzbads, auf die Temperatur und auf die Wechselwirkungszeit haben. Diese Einflüsse wurden in Kapitel 3.2.1 bereits erläutert.

Zur Umsetzung der Untersuchungen werden statistische Versuchspläne aufgestellt. Hierzu müssen die relevanten Größen identifiziert werden, die den Prozess beeinflussen. Die Parameter beim Laserpolieren von Kunststoffen sind abhängig vom Material, der Laserstrahlquelle, der Laseroptik und vom eigentlichen Prozess inklusive der Bearbeitungs- und Pausenzeiten. Die variablen Prozessparameter, die für die folgende Studie verwendet werden, sind in Tabelle 4 aufgelistet.

**Tabelle 4** Übersicht der in den Versuchsreihen variierten Prozessparameter

| Prozessparameter | Symbol | Einheit | Definition |
|---|---|---|---|
| Anzahl Überfahrten | n | a.u. | Anzahl der Bearbeitungen pro Fläche |
| Laserleistung | $P_L$ | W | Ausgangsleistung des Lasers |
| Laserstrahl-durchmesser | $d_L$ | µm | Laserstrahldurchmesser auf der Probe |
| Pausenzeit | $t_P$ | s | Dauer der Zeit zwischen zwei Überfahrten |
| Probenfeuchtigkeit | F | - | Feuchtigkeitsgehalt der Kunststoffprobe |
| Scangeschwindigkeit | $v_{scan}$ | mm/s | Geschwindigkeit, mit der die Probe unter dem Laserstrahl bewegt wird |
| Spurüberlagerung | dy | % | Überlagerung zweier bearbeiteter Linien in Prozent des Strahldurchmessers |
| Zieltemperatur | $T_{SOLL}$ | °C | Am PID-Regler eingestellte Zieltemperatur |

Entsprechend dem Vorgehen der statistischen Versuchsplanung (Kapitel 3.4) werden zunächst das Ziel und der Versuchsplan definiert. Hierzu wurden bereits die Faktoren bestimmt, die den variierten Prozessparametern entsprechen. Als nächstes wird eine Hypothese aufgestellt, ob ein Faktor einen Einfluss hat und welchen Einfluss er vermutlich auf die Rauheitsreduktion hat. Eine Übersicht hierzu wird in Tabelle 5 gezeigt.

**Tabelle 5**
Hypothesen-aufstellung für die folgenden Versuchsreihen unter der Bedingung, dass der Prozess temperaturgeregelt durchgeführt wird.

| Parameter | | | Hypothese | |
|---|---|---|---|---|
| Anzahl Überfahrten | n | ↑ | Sa | ↓ |
| Laserstrahldurchmesser | $d_L$ | ↑ | Sa | ↓ |
| Probenfeuchtigkeit | F | ↑ | Sa | ↑ |
| Pausenzeit | $t_P$ | ↑ | Sa | → |
| Scangeschwindigkeit | $v_{scan}$ | ↑ | Sa | ↑ |
| Spurüberlagerung | dy | ↑ | Sa | → |
| Zieltemperatur | $T_{Soll}$ | ↑ | Sa | ↓ |

Die Übersicht zeigt, welcher systematische Einfluss durch die Erhöhung der einzelnen Faktoren auf die Flächenrauheit Sa zu erwarten ist. Diese Einschätzung ist unter der Voraussetzung getroffen, dass der Polierprozess temperaturgeregelt stattfindet und dass jeder Faktor einzeln, d.h. weitgehend unabhängig von den anderen Parametern, betrachtet wird. Eine Temperaturregelung wird für die Hauptuntersuchungen als zielführend gesehen, da durch die reine Variation der einzelnen Parameter nicht alle Parametergrenzen ausgetestet werden können, da ansonsten die Temperatur in der Probe zu hoch wird. So können z.B. nicht alle Variationen zwischen Laserstrahlgröße und Scangeschwindigkeit durchgeführt werden, da die Intensität auf der Probe bereits zur Verbrennungstemperatur führt. Durch die Temperaturregelung können diese durchgeführt werden, da die Laserleistung $P_L$ entsprechend angepasst wird. Außerdem gewährleistet die Temperaturregelung, dass die Temperatur über die Bearbeitungsfläche konstant bleibt und sich nicht mit der Prozessdauer erhöht und so zu nicht vergleichbaren Ergebnissen führt. Dies ist durch die reine Variation der Laserleistung nicht möglich.

Werden die **Pausenzeit $t_P$** und die **Spurüberlagerung dy** erhöht bzw. gesenkt, wird angenommen, dass dies keinen Einfluss auf die Flächenrauheit Sa hat. Beide Faktoren haben bei der Erhöhung einen direkten Einfluss auf die Temperatur im Bearbeitungspunkt und können bei falscher Auswahl zur Verbrennung bzw. Zersetzung des Probenmaterials führen. Da die Prozesstemperatur über die Laserleistung geregelt wird, wird diesem Effekt vorgebeugt und die Faktoren

haben keinen direkten Einfluss. Zur effizienten Bearbeitung sollten beide Parameter daher möglichst klein gewählt werden.

Die **Anzahl Überfahrten n** sorgt grundsätzlich für eine schrittweise Reduktion der Oberflächenrauheit, da mit jedem neuen Aufschmelzen eine glattere Ausgangsrauheit zu erwarten ist. Werden die anderen Faktoren so eingestellt, dass die Oberfläche bereits nach einer Überfahrt eine große Rauheitsreduktion erreicht, hat die Anzahl der Überfahrten keinen bedeutenden Einfluss mehr auf das Prozessergebnis. Erwartet wird, dass umso höher die Ausgangsrauheit vor einer Überfahrt ist, desto höher das Potenzial zur Rauheitsreduktion ausfällt.

Der **Laserstrahldurchmesser $d_L$** sollte so groß wie möglich gewählt werden, um die kleinstmögliche Flächenrauheit Sa zu erreichen. Bei einer Änderung des Laserstrahldurchmessers wird bei gleichbleibender Laserleistung die Intensität auf der Oberfläche geändert. Durch das gaußförmige Strahlprofil wird die Intensität nach außen geringer und somit auch die Temperatur. Durch den Temperaturgradienten verändern sich ebenfalls die Viskosität und die Oberflächenspannung an der Schmelzbadoberfläche. Bei hoher Temperatur sind die Viskosität und die Oberflächenspannung in der Mitte niedriger als am Rand. Durch den sogenannten Marangoni-Effekt wird die schmelzflüssige Masse vom Ort niedriger Oberflächenspannung, also der Mitte, zum Ort hoher Oberflächenspannung getragen, also zum Rand hin. Für den Gradienten der Oberflächenspannung $\sigma$ gilt in horizontaler y-Richtung Formel 5.3. [37].

**5.3**

$$\frac{\partial \sigma}{\partial y} = \frac{\partial \sigma \cdot \partial T}{\partial T \cdot \partial y}$$

Dies könnte dafür sorgen, dass beim Laserpolieren mit mehreren Bahnen eine Welligkeit erzeugt wird, sodass die Flächenrauheit im hohen Ortswellenlängenbereich $\Lambda$ erhöht wird, wenn viele schmale Linien durch den Laser erzeugt werden. Zu groß sollte der Laserstrahldurchmesser allerdings auch nicht gewählt werden, da die Bewegung im Schmelzbad dadurch stärker ausgeprägt ist, was wiederum zu Welligkeit beim Laserpolieren führen kann. Mindestens sollte der Laserstrahldurchmesser die halbe Wellenlänge der Oberflächenstruktur betragen (siehe Kapitel 3.2.1).

Die **Probenfeuchtigkeit F** wird in zwei Stufen variiert. Entweder wird die Probe direkt bearbeitet oder sie wurde vor dem Versuch etwa fünf Stunden bei 100 °C auf der Heizplatte getrocknet und anschließend für den Versuch verwendet. Während der Versuchsvorbereitung ist die Probe wieder auf Raumtemperatur abgekühlt. Die Zeit zwischen Trocknung und Versuchsdurchführung wurde allerdings so gering wie möglich gehalten. Ein Experiment zur Ermittlung des Trocknungseffekts durch eine Heizplatte ist in Bild **17** dargestellt. Durch das Trocknen wird nach vier Stunden etwa eine 0,28-prozentige Gewichtsreduktion der Probe erreicht.

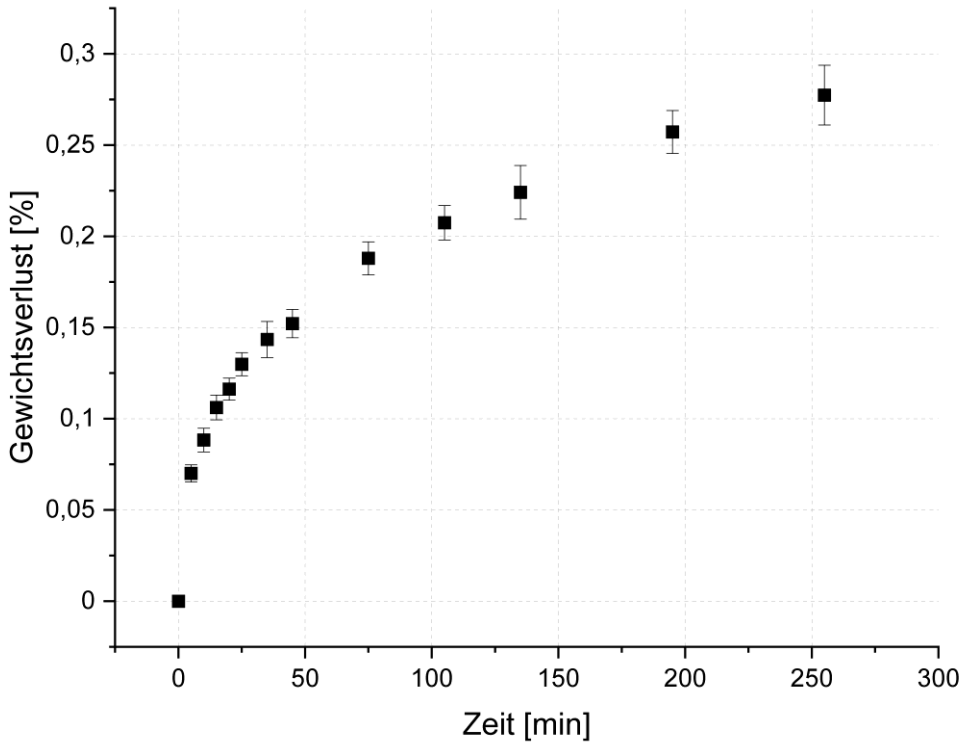



**Bild 17** Experiment zur Effektivität der Probentrocknung mittels Heiztrocknen bei 100 °C. Abgebildet ist der Mittelwert aus drei Proben Polyamid 12, die zu verschiedenen Zeitpunkten mit einer Feinwaage gewogen wurden.

Einige Polymere haben eine Veranlagung dazu, Feuchtigkeit aufzunehmen. Umso mehr Feuchtigkeit im Material vorhanden ist, desto länger muss das Material bearbeitet werden, um eine schmelzflüssige Phase auszubilden. Das Wasser im Material verdampft beim Erwärmen der Probe, wodurch eine Erhöhung der Temperatur vorerst ausbleibt. Erst nachdem das Wasser verdampft wurde, beginnt die Temperatur zu steigen und das Schmelzbad sich auszubilden.

Durch die **Scangeschwindigkeit $v_{scan}$** wird die Wechselwirkungszeit zwischen der Laserstrahlung und der Oberfläche direkt beeinflusst. Kunststoffe verhalten sich, wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben, viskoelastisch. Die Viskosität ist bei solchen Fluiden, zusätzlich zum Druck und der Temperatur, abhängig von der Zeit. Beim Übergang des Kunststoffs in den schmelzflüssigen Zustand werden die Wechselwirkungen zwischen den Polymerketten schwächer aufgrund der Molekülbewegungen bei steigenden Temperaturen. Da die Wechselwirkungszeit direkt von der Scangeschwindigkeit abhängt, kann die Laserstrahlung durch eine langsame Scangeschwindigkeit länger mit dem Werkstoff interagieren, um die für die Kunststoffschmelze erforderliche Wärme zu erzeugen Die Scangeschwindigkeit sollte dementsprechend so gering wie möglich gehalten werden, um die Viskosität weitmöglichst zu reduzieren und die Fließeigenschaften zu verbessern.

Zu guter Letzt wird die **Zieltemperatur $T_{SOLL}$** als Faktor variiert. Die Zieltemperatur reguliert direkt die Laserleistung $P_L$ im Prozess. Die Temperatur hat einen wesentlichen Einfluss auf die Oberflächenspannung und die Viskosität im Schmelzbad. Grundsätzlich gilt, umso höher die Temperatur desto niedriger sind beide Parameter. Allerdings ist der Übergang von der Erweichung des Materials zur Verbrennung fließend, sodass die Schwelle nach oben so gewählt werden sollte, dass keine sichtbare Rauchbildung, und somit Verbrennung, stattfindet. Die Zieltemperatur sollte möglichst nah der Verbrennungstemperatur des Polymers gewählt werden, ohne dass die Verbrennung einsetzt, um eine möglichst niedrige Flächenrauheit zu erzeugen. Aufgrund der stark variierenden thermophysikalischen Eigenschaften der Polymere kann diese obere Schwelle nur experimentell bestimmt werden, da die Tabellenwerte oft sehr breite Schwankungsbereiche haben.

Die hier aufgestellten Hypothesen werden in den folgenden Versuchsreihen auf ihren Wahrheitsgehalt überprüft und dienen zur Entwicklung eines besseren Verständnisses für das Laserpolieren. Exemplarisch werden die Versuche mit Polyamid 12 durchgeführt.

# 6 Experimentelle Untersuchungen

Der Laserpolierprozess von Kunststoffen wurde am Fraunhofer ILT in verschiedenen Vorhaben untersucht. Eine statistische, strukturierte Untersuchung der Einflussgrößen wurde bis jetzt allerdings nicht durchgeführt. Für den Kunststoff PA12 wurden zum Zeitpunkt der Durchführung noch keine Ergebnisse zur Parameterfindung beim Laserpolieren publiziert. Im Folgenden wird daher eine Parameterstudie auf der Basis der statistischen Versuchsplanung am Beispiel von PA12 durchgeführt. Im Fokus dieser Parameterstudie steht nicht die Optimierung der Prozessparameter zur Erzielung der höchsten Rauheitsreduktion, sondern die qualitative Bestimmung des Einflussfaktors der einzelnen Parameter, um daraufhin eine Optimierung durchführen zu können.

## 6.1 Eingrenzung des Parameterraums zur Durchführung experimenteller Versuchsreihen

### 6.1.1 Ausgangssituation und Untersuchungsziel

Der erste Versuchsplan dient zur allgemeinen Einschätzung des Prozesses. Durch bisherige Arbeiten wurden bereits Parameterkombinationen ermittelt, die gute, aber teilweise nicht reproduzierbare, Ergebnisse erzielten. Diese wurden allerdings nicht durch eine umfangreiche statistische Analyse unterstrichen. Diese Erfahrungswerte dienen diesem Versuchsplan als Grundlage. Mit dem Versuchsaufbau mit ortsaufgelöster Temperaturmessung, wie er in Kapitel 4.2.2 beschrieben ist, wurden bisher noch keine Parameter getestet. Ziel des ersten Versuchsplans ist eine grobe Eingrenzung der Parameter und die Einordnung der Prozesstemperatur als relevanter Parameter für den Laserpolierprozess. In diesem Szenario wird die Temperatur noch nicht geregelt, sondern die Laserleistung variiert.

### 6.1.2 Festlegung der Basisparameter

Zur Realisierung eines Versuchsplans werden die in Kapitel 5 genannten Parameter nach dem Verfahren der statistischen Versuchsplanung variiert. Neben den variierten Parametern existieren Zielgrößen und protokollierte Werte.

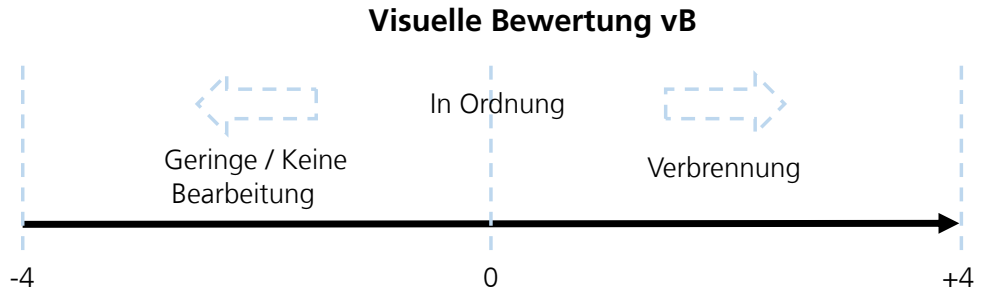
**Tabelle 6**
Ausgewählte Faktoren, Zielgrößen und mitprotokollierte Parameter für die Versuchsreihe I

| Einflussgröße | Symbol | Typ | Stufen |
|---|---|---|---|
| **Prozessparameter** | | | |
| Probenfeuchtigkeit | F | Qualitativ | 2 |
| Laserstrahldurchmesser | $d_L$ | Quantitativ | 5 |
| Scangeschwindigkeit | $v_{scan}$ | Quantitativ | 5 |
| Laserleistung | $P_L$ | Quantitativ | 5 |
| Spurüberlagerung | dy | Quantitativ | 5 |
| Anzahl Überfahrten | n | Quantitativ | 5 |
| Zeit zwischen Überfahrten | $t_p$ | Quantitativ | 5 |
| **Zielgrößen** | | | |
| Flächenrauheit | Sa | Quantitativ | |
| Visuelle Bewertung | vB | Qualitativ | |
| **Protokollierte Größen** | | | |
| Prozesstemperatur | $T_{SOLL}$ | Quantitativ | |
| Vollständigkeit | - | Qualitativ | |
| Wechselwirkungszeit | $t_w$ | Quantitativ | |

Tabelle 6 enthält alle Parameter, die in der Versuchsplanung berücksichtigt wurden. Entsprechend wurden sieben Parameter ausgewählt, die in verschiedenen Stufen variiert werden. Als Zielgrößen wurden die Flächenrauheit und die visuelle Bewertung vB festgelegt. Die Prozesstemperatur wurde mit dem Pyrometer DPE10M von DIAS Infrared Systems GmbH im Bearbeitungspunkt aufgenommen. An dieser Stelle ist zu beachten, dass stets ein Emissionsgrad von $\varepsilon = 1$ angenommen wurde, da der korrekte Wert für das 3D-gedruckte PA12 nicht bekannt ist und dieser sich beim Übergang in die schmelzflüssige Phase ändert. Da keine absoluten Temperaturwerte verwendet werden, kann diese Anpassung durchgeführt werden. Der Wert gibt die Temperaturstrahlung wieder und nicht die reale Temperatur. Die visuelle Bewertung vB entspricht einer subjektiven, visuellen Einschätzung und stellt eine qualitative Größe dar. Sie hängt stark mit der Vollständigkeit des Prozessablaufes zusammen, die das menschliche Eingreifen in den Prozess darstellt. Da in diesem Versuchsplan die Prozessgrenzen abgesteckt werden und die Parameter konsequent in den laut Versuchsplan vorgegebenen Kombinationen ausgeführt werden, kann die Prozesstemperatur bei verschiedenen Versuchen zu hoch werden und zu einer Rauchbildung oder sogar Verbrennung der Probe führen. In solchen Fällen wurde der Versuch abgebrochen und die Unvollständigkeit protokolliert. Stark abgetragene Oberflächen sind stellenweise sehr glatt und haben eine geringere Oberflächenrauheit als die gewöhnlich polierten Proben, sodass die subjektive Größe „visuelle Bewertung“ eingeführt wurde, um diesen Effekt zu

berücksichtigen. Im Gegensatz dazu können geringe Prozesstemperaturen dazu führen, dass die Oberfläche einen geringen oder keinen Poliereffekt aufweist, da die eingebrachte Energie nicht ausreicht, um die Oberfläche aufzuschmelzen. Dieser Effekt wird ebenfalls in der visuellen Bewertung definiert. Die Erklärung zur Definition der visuellen Bewertung ist in Bild 18 dargestellt.

**Bild 18**
Bewertungskriterium visuelle Bewertung vB zur subjektiven und visuellen Beurteilung des Polierergebnisses




### 6.1.3 Festlegung des Versuchsplans

Anhand der festgelegten Parameter und Parameterstufen wird ein Versuchsplan erstellt. Die Parameterstufen werden vor der Erstellung des Plans mit Werten ausgefüllt. Hierzu dienen als Ansatz die Werte, die bisher für den Laserpolierprozess verwendet wurden. Als Versuchsparameter wurden die in Tabelle 7 gezeigten Werte festgelegt. In diesem Versuchsplan wird noch keine Temperaturregelung verwendet, sodass die Scangeschwindigkeiten größer 600 mm/s verwendet werden können.

**Tabelle 7**
Versuchsparameter für die erste experimentelle Versuchsreihe

| | **Parameterstufen** | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Parameter** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** |
| **F** | Getrocknet | Nicht getrocknet | | | |
| **$d_L$** | 400 µm | 600 µm | 900 µm | 1500 µm | 3000 µm |
| **$v_{scan}$** | 50 mm/s | 100 mm/s | 300 mm/s | 600 mm/s | 1000 mm/s |
| **$P_L$** | 3 W | 10 W | 17 W | 24 W | 30 W |
| **dy** | 50% | 82,6% | 90,5% | 93,4% | 95% |
| **n** | 1 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| **$t_p$** | 0 s | 5 s | 10 s | 20 s | 30 s |

Zur Erstellung der Versuchspläne dienen vorgefertigte Tabellen von Taguchi, in diesem Fall wurde ein L50 Plan verwendet (siehe Anhang 12.1) [38]. Alle Parameter bis auf die Probenfeuchtigkeit werden in fünf Stufen variiert, während die Probenfeuchtigkeit als getrocknet und nicht getrocknet angegeben wird. Getrocknet wurden die Proben, indem sie zuvor auf der Heizplatte bei 100 °C

für fünf Stunden getrocknet wurden. Der Versuchsplan wurde exakt nach den Angaben des Taguchi-Plans durchgeführt. Wenn eine Probe zu heiß wurde, sodass sie verbrennt, wurde der Prozess manuell abgebrochen und dies entsprechend dokumentiert.

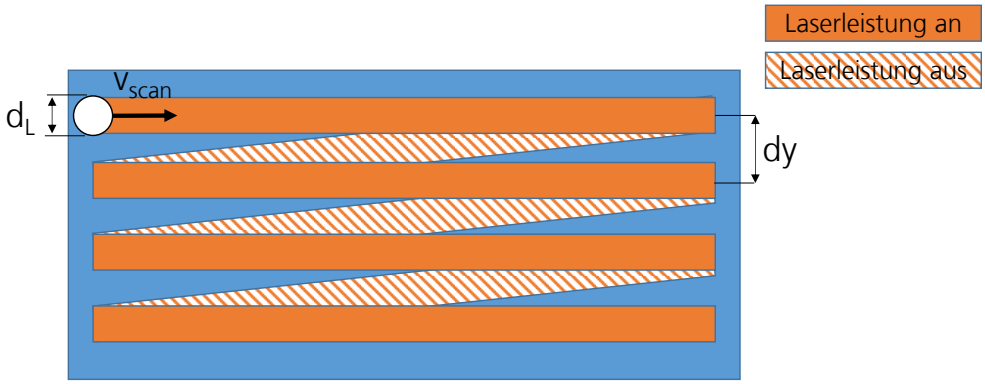



**Bild 19**
Bearbeitungs-strategie für die experimentellen Versuchsreihen zum Laserpolieren

Die Bearbeitungsstrategie ist in Bild 19 dargestellt. Die Bearbeitung findet reihenweise statt, wobei der Laser in Bearbeitungsrichtung von links nach rechts eingeschaltet ist. Anschließend wird die Probe zurückgefahren mit einem diagonalen Versatz, um die zweite Reihe zu beginnen. Der Laser ist während dieser Rückfahrt ausgeschaltet, sodass keine Bearbeitung stattfindet. Die Spurüberlagerung dy wird in Prozent in Abhängigkeit des Laserstrahl-durchmessers angegeben. Ein Spurüberlagerung von 50 % bedeutet dementsprechend, dass die Spuren zur Hälfte überlappen.

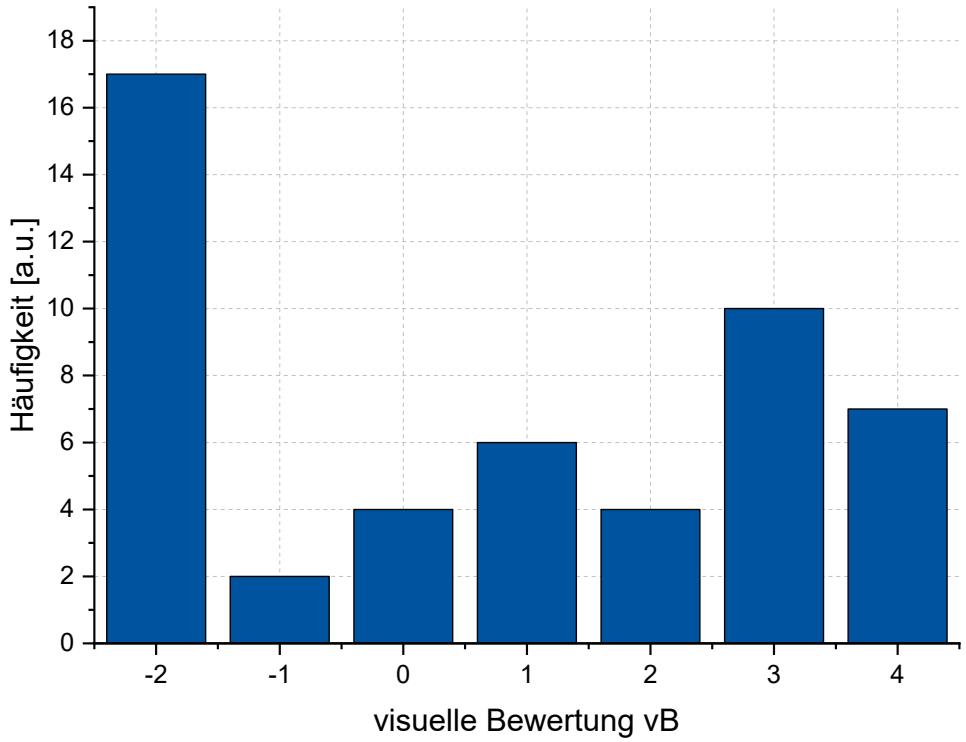
### 6.1.4 Ergebnisse

Das Ergebnis des Versuchsplans zeigt, dass die Parametervariationen aus dem Versuchsaufbau mit Laserscanner im Gegensatz zu dem mit der Linearachse nicht übertragen werden können. Aus insgesamt 50 Proben konnten nur vier Proben mit einem angemessenen Ergebnis poliert werden, für die anderen Proben war entweder die Temperatur zu hoch, sodass eine Verbrennung des Materials stattfand oder zu niedrig, sodass eine geringe oder keine Bearbeitung zu erkennen war. Da die Oberflächenrauheit in diesem Fall nicht als relevante Ausgangsgröße verwendet werden kann, wird zum einen die visuelle Bewertung der Ergebnisse betrachtet und zum anderen die gemessene Temperatur im Bearbeitungspunkt.

Bei Betrachtung der visuellen Bewertung wird deutlich, dass der Parameterraum zu groß gewählt wurde. Dies ist allerdings für einen ersten Plan schwer zu vermeiden, da bei einem quadratischen Plan immer auch die Extreme in den Randbereichen mit getestet werden. In Bild 20 ist ein Histogramm der Verteilung der visuellen Bewertung dargestellt. Die visuelle Bewertung ist wie in Bild 18

definiert und gibt an, wie der Polierprozess optisch und subjektiv einzuordnen ist, von verbrannt bis geringe / keine Bearbeitung sichtbar. Die Proben wurden von -2 bis +5 eingeordnet, wobei -2 keine sichtliche Bearbeitung darstellt und +5 bereits eine starke Verbrennung mit Prozessabbruch. Vier der 50 polierten Proben wurden mit „0“ bewertet, d.h. erzielten ein gutes Polierergebnis. 17 wurden gar nicht bearbeitet (-1), zwei nur geringfügig (-1) und 27 wurden als zu stark bearbeitet eingestuft (+1 bis +5).

**Bild 20** Häufigkeit der verschiedenen visuellen Bewertungen in Versuchsreihe I




Die Einflüsse der Parameter auf die visuelle Bewertung sind in Bild 21 dargestellt. Die einzelnen Parameter streuen über die visuelle Bewertung stark und ein eindeutiger Zusammenhang ist nicht zu erkennen. Dies lässt darauf schließen, dass die einzelnen Parameter keinen direkten Einfluss auf die visuelle Bewertung haben, sondern vielmehr die Kombination der Parameter.

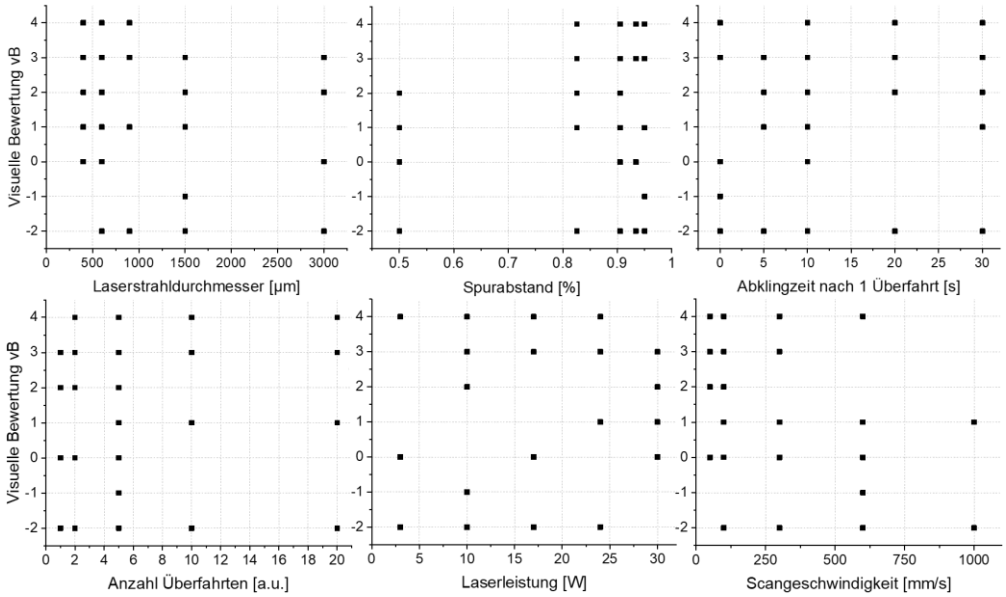



**Bild 21** Visuelle Bewertung in Abhängigkeit der verschiedenen Parameter.

Dies wird zum Beispiel ersichtlich, wenn die visuelle Bewertung über die Kombination aus Laserleistung und Scangeschwindigkeit betrachtet wird, wie in Bild 22 dargestellt. Bei hohen Laserleistungen und geringer Scangeschwindigkeit sind die meisten Proben verbrannt (hohe visuelle Bewertung) und bei niedrigen Laserleistungen und hoher Geschwindigkeit sind sie nicht bearbeitet worden (niedrige visuelle Bewertung). Das Diagramm zeigt eine Diagonale, in der eine geeignete Bearbeitung stattfand, sodass diese Parameterkombinationen verwendet werden können in späteren Versuchen.

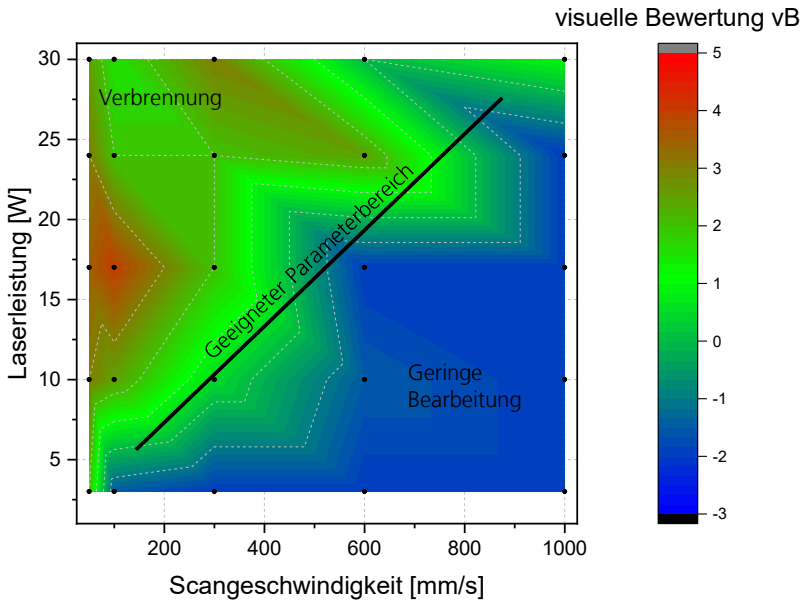



**Bild 22** Ergebnis der ersten experimentellen Versuchsreihe. Darstellung der visuellen Bewertung über die Laserleistung und die Scangeschwindigkeit

Im Anschluss wurde die visuelle Bewertung in Abhängigkeit der Temperatur untersucht, die während des Prozesses ortsaufgelöst gemessen wurde. Das Diagramm in Bild 23 beschreibt die visuelle Bewertung über die im Prozess gemessene Temperatur. Die Stufen der visuellen Bewertung sind farblich dargestellt, wobei grün eine auswertbare Bearbeitung darstellt. Als auswertbar wurden Proben mit vB = 0 und vB = 1 definiert. Bei Proben mit einer visuellen Bewertung von eins wurde zwar eine Rauchbildung beobachtet, die Probenoberfläche ist aber so weit intakt, dass sie mit dem Weißlichtinterferometer ausgewertet werden könnte. Laut diesem Ergebnis lassen sich im Temperaturbereich von etwa 180 °C bis 300 °C gute Bearbeitungen durchführen, die weder zu stark noch zu schwach sind. Hierbei sei daran erinnert, dass der Emissionsgrad mit $\varepsilon = 1$ nicht vollständig dem des Materials entspricht, sodass die absoluten Temperaturwerte geringfügig nach unten abweichen können. Diese Werte stimmen mit den Materialeigenschaften von PA12 überein, da der Schmelzbereich bei 180 °C beginnt und der Kunststoff bei Temperaturen über 300 °C verbrennt. Bei Temperaturen kurz oberhalb der Verbrennungstemperatur werden die besten Ergebnisse laut der subjektiven visuellen Bewertung erreicht.

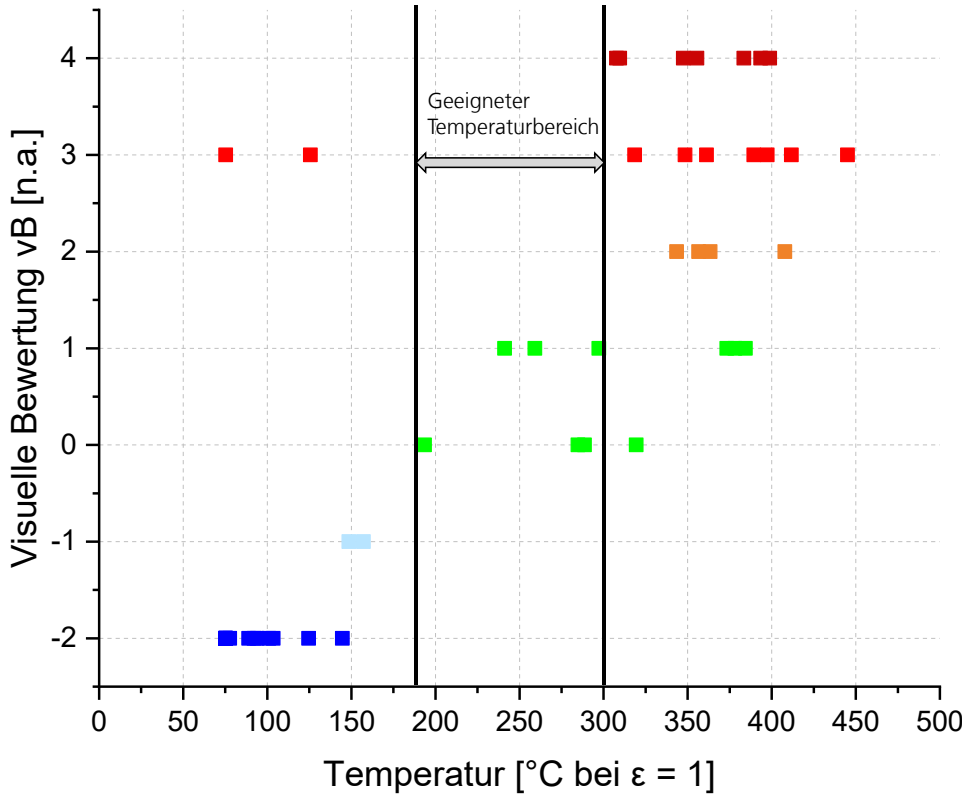



**Bild 23** Darstellung der visuellen Bewertung über die ortsaufgelöst gemessene Temperatur mit Einzeichnung des geeigneten Temperaturbereichs für weitere Bearbeitungen.

Dieses Ergebnis wurde bereits in der Dissertation von A. Richmann an Polycarbonat festgestellt [13], sodass diese Eigenschaft auf andere Kunststoffe übertragbar zu sein scheint. Zudem greift diese Erkenntnis die These erneut auf, dass die Temperatur einen entscheidenden Einfluss auf das Laserpolierergebnis hat und dass ein optimaler Temperaturbereich existiert. Umso höher die Temperatur des Schmelzbads ist, desto geringer ist dessen Viskosität, d.h. desto besser fließend der Kunststoff in der schmelzflüssigen Phase. Bei welcher Temperatur das beste Rauheitsergebnis erzielt wird, ist aus diesem ersten Versuch nicht erkennbar, da die visuelle Bewertung nur für die erste Überfahrt definiert wurde und die Proben danach weiterbearbeitet wurden. Diese Zusammenhänge gilt es mit einem weiteren Versuchsplan zu bestätigen und zu quantifizieren.

### 6.1.5 Fazit

Versuchsreihe I gibt eine grobe Übersicht über das Prozessverhalten, insbesondere, dass eine Vielzahl des verwendeten Parameterraumes für das Laserpolieren ungeeignet ist. Gleichzeitig ist eine klare Parameterabhängigkeit aus den bisherigen Versuchen noch nicht erkennbar. Herausgestellt hat sich allerdings, dass die Temperatur sich als einflussreicher Parameter stark

hervorhebt, sodass diese im Versuchsplan II als Prozessparameter betrachtet und die Laserleistung durch die Zieltemperatur ersetzt wird. Dies führt dazu, dass die Proben weiterhin in einem großen Parameterbereich untersucht werden können, ohne dass sie verbrennen oder gar nicht bearbeitet werden. Auf diese Weise kann ein größerer Parameterbereich untersucht werden. Dies ist von Vorteil, da die Auswertung der Ergebnisse einen Rückschluss über den Einfluss der Parameter innerhalb des Parameterraums gibt. Wenn dieser möglichst groß gewählt wird, können demnach mehr Aussagen über einen großen Wertebereich getroffen werden. Zur Optimierung der Rauheitsreduktion ist im Nachgang an diese Versuchsreihen ein Plan mit kleinen Prozessgrenzen geeignet.

## 6.2 Bestimmung des Einflusses verschiedener Prozessparameter auf die Rauheitsreduktion beim Laserpolieren

### 6.2.1 Untersuchungsziel

In der zweiten experimentellen Versuchsreihe werden die in Kapitel 6.1 dargestellten Informationen genutzt und neu aufgearbeitet. Die Laserleistung $P_L$ wird im zweiten Versuchsplan durch die Zieltemperatur $T_{SOLL}$ ersetzt, die bisher als Ausgangsgröße behandelt wurde. Auf diese Weise kann das breite Fenster der restlichen Parameter beibehalten werden, um in einem möglichst großen Bereich von Parameterkombinationen zu analysieren. Ohne Temperaturregelung können einige Parameterkombinationen, wie z.B. eine niedrige Scangeschwindigkeit mit einem großen Spurüberlapp nicht realisiert werden, da die Probe überhitzen würde. Der Versuchsplan umfasst, wie in der ersten Versuchsreihe, 50 Versuche und wird zur Erhöhung der statistischen Genauigkeit dreimal wiederholt. Ziel der Auswertung ist die Analyse der Einflussgrößen in Hinsicht auf die Reduktion der Rauheit und die Berechnung des jeweiligen systematischen Einflusses der einzelnen Parameter. Aufgrund der in der vorangegangenen Versuchsreihe gemessenen Temperaturen konnte der Temperaturbereich eingegrenzt werden, sodass die Temperatur nun als Prozessparameter eingesetzt werden kann.

### 6.2.2 Festlegung des Versuchsplans

Der Versuchsplan ist erneut nach dem L50-Plan von Taguchi aufgebaut und beinhaltet die gleichen Parameter wie in Kapitel 6.1. Einzig die Laserleistung wurde durch die Temperatur $T_{SOLL}$ ersetzt. Die Definition der Temperatur ist an dieser Stelle von enormer Bedeutung, da die im Versuchsplan eingestellte Temperatur lediglich die Zieltemperatur $T_{SOLL}$ ist und diese nicht zwingend der auf der Oberfläche $T_{PYRO}$ entspricht oder der realen Temperatur. Diese Differenz kommt zum einen durch die Messfehler der kontaktlosen Infrarotmessung zustande, da der reale Emissionsgrad des Materials nicht bekannt ist und die Messgenauigkeit nicht 100 % beträgt. Zum anderen wird die Temperatur auf der Oberfläche durch einen PID-Regler eingestellt, wodurch ebenfalls

Abweichungen und Schwankungen entstehen können (Siehe Kapitel 4.1.3 und 4.2.3). Die ausgewählten Parameter sind in Tabelle 8 dargestellt.

**Tabelle 8** Verwendete Parameter im Versuchsplan II

| Parameterstufen | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Parameter** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** |
| F | G.* | N.G.* | | | |
| $d_L$ | 400 µm | 600 µm | 900 µm | 1.5 mm | 3 mm |
| $v_{scan}$ | 50 mm/s | 100 mm/s | 200 mm/s | 400 mm/s | 600 mm/s |
| $T_{SOLL}$ | 200 °C | 230 °C | 260 °C | 290 °C | 320 °C |
| dy | 50 % | 60 % | 70 % | 80 % | 90 % |
| n | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 |
| $t_p$ | 0 s | 5 s | 10 s | 20 s | 30 s |

* G = Getrocknet; N.G. = Nicht getrocknet

Die Scangeschwindigkeit wurde geringer gewählt im Gegensatz zum vorherigen Versuchsplan, sodass der maximale Wert 600 mm/s statt 1000 mm/s beträgt. Dies ist auf die Temperaturregelung zurückzuführen, da die Regelung durch das Pyrometer mit der Einstellzeit von 1 ms für einen solch schnellen Prozess ansonsten nicht ausreichend ist. Eine schnellere Scangeschwindigkeit würde die eingestellte Temperatur stark beeinträchtigen und zu starken Abweichungen in den Prozessparametern führen und damit das Ergebnis verfälschen. 600 mm/s wurde als maximale Geschwindigkeit festgelegt, bei der die Temperaturregelung zuverlässig funktioniert. Die Spurüberlagerung dy wurde auf volle Zehnerprozente gerundet. Da viele Proben in Versuchsplan I bereits nach einer Überfahrt stark überhitzt waren, wurden die Anzahl Überfahrten auf maximal 10 begrenzt und dafür eine Zwischenstufe mit n = 3 eingefügt. Der Plan wurde zur statistischen Belastbarkeit dreimal wiederholt und ausgewertet.

### 6.2.3 Ergebnisse

In diesem zweiten Versuchsplan sind alle Proben auswertbar, ohne dass eine Verbrennung der Proben stattgefunden hat, sodass das Fazit aus Kapitel 6.1, dass die Temperaturregelung eine zielführende Methode ist, bestätigt wurde. Die Flächenrauheit Sa wird mit dem Weißlichtinterferometer bestimmt bei einer Messfeldgröße von 5 mm x 5 mm und einer Auflösung von 2560 x 2558 Pixel. Pro Probe wurden drei Messfelder ausgewertet. Die Ergebnisse werden im Folgenden mit Hilfe einer Varianzanalyse (Analysis of Variance, ANOVA) gemäß der statistischen Versuchsplanung ausgewertet.

#### 6.2.3.1 **Normalverteilung der Ergebnisse**

Da die Auswertung der Versuchsdaten mit Hilfe einer ANOVA durchgeführt wird und dafür der Fokus auf den statistischen Ergebnissen liegt, wurden die Ergebnisse auf ihre Verteilung überprüft. Die Bildung des Mittelwerts und der Standardabweichung ist nur aussagekräftig, wenn die Ergebnisse einer Normalverteilung unterliegen. In einem anderen Fall wird die Auswertung verfälscht und die Ergebnisse können auf falsche Rückschlüsse weisen.

Zur Überprüfung der Normalverteilung werden die Daten einem Shapiro-Wilk-Test unterzogen. Der Shapiro-Wilk-Test ist ein statistischer Signifikanztest, mit dem überprüft wird, ob die Grundgesamtheit der Stichprobe normalverteilt ist. Er besitzt eine hohe Güte (Trennschärfe) und kann bereits bei sehr kleinen Stichproben verwendet werden. Die Berechnung findet über die Stichprobenvarianz statt. [39, 40]

**6.1**

$$W = \frac{b^2}{S^2}$$

Zur Bewertung der Verteilung wird das Verhältnis W berechnet (siehe Formel 6.1), das als Korrelationskoeffizient interpretiert werden kann. Es beschreibt das Verhältnis der erwarteten Varianz der Stichprobe $b^2$ und der nicht korrigierten Stichprobenvarianz $S^2$. [39, 40]

**6.2**

$$S^2 = \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2$$

**6.3**

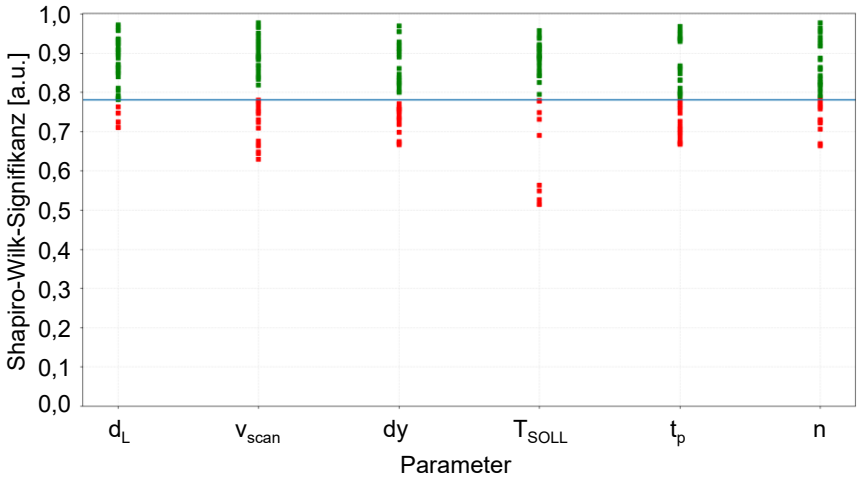
$$b = \sum_{i=1}^{k} a_{n-i+1} \cdot (y_{n-i+1} - y_i)$$

Die nicht korrigierte Stichprobenvarianz $S^2$ wird nach Formel 6.2 berechnet, wobei x die Werte der Stichprobe sind und $\bar{x}$ der Mittelwert der Stichprobe. Die zu erwartende Stichprobenvarianz b wird nach Formel 6.3 berechnet. Die Werte des Parameters a hängen hierbei von der Größe der Stichprobe ab und können in der Tabelle von Shapiro und Wilk nachgeschlagen werden. Der Wert k beträgt die Hälfte der Stichprobengröße, wobei bei einer ungeraden Größe mit k = (n-1)/2 gerechnet wird. Nach Berechnung der Werte wird der Wert W mit den kritischen Grenzen $W_\alpha$ der Normalverteilungsannahme verglichen. Ist der errechnete Wert kleiner als die kritische Grenze, ist die These der Normalverteilung widerlegt und andernfalls bestätigt. [39, 40]

Für die Varianzanalyse werden alle Daten, von denen die Varianz und der Mittelwert bestimmt werden, mit Hilfe dieses Tests auf ihre

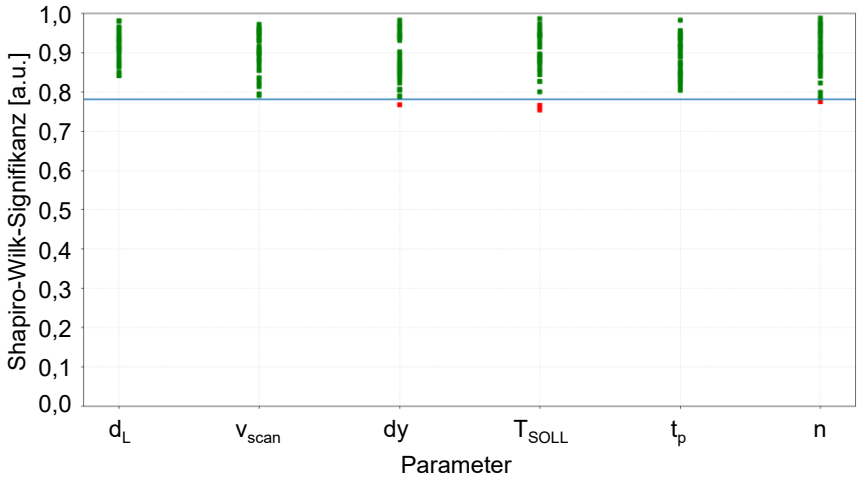
Verteilungseigenschaften überprüft und sichergestellt, dass diese einer Normalverteilung entspricht. In Bild 24 sind die Ergebnisse für die Rauheitswerte dargestellt. Überprüft wurden jeweils die einzelnen Blöcke, aus denen statistische Werte entnommen werden. Dies entspricht einem Test für jede Parameterstufe und jede Ortswellenlänge. In diesem Fall sind rund 60 % der Daten normalverteilt, sodass eine statistische Auswertung zu Fehlern führen kann.

**Bild 24** Ergebnis des Shapiro-Wilk-Tests für die Versuchsergebnisse von Versuchsreihe II.




Um Fehler in der statistischen Auswertungsmethode zu vermeiden, werden die Daten transformiert. Diese Transformation ändert einzig das Verhältnis der Werte untereinander und kann verwendet werden, ohne das Ergebnis zu verfälschen. In diesem Fall bietet sich die Annahme einer logarithmischen Verteilung an, da die Werte alle positiv sind und die Werte eine hohe Schwankungsbreite haben. Werden die Werte einer logarithmischen Verteilung logarithmiert sind die entstehenden Daten normalverteilt und die Unterschiede in der Standardabweichung verringern sich. [28, 41] Die Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests der transformierten Daten sind in Bild 25 dargestellt.

**Bild 25** Ergebnis des Shapiro-Wilk-Tests für die Versuchsergebnisse von Versuchsreihe nach der Transformation




Der Test auf Normalverteilung zeigt, dass bis auf drei alle der transformierten Datensätze normalverteilt sind, sodass auf Basis dieser Werte eine statistische Auswertung nachvollziehbar ausgeführt werden kann.

### 6.2.3.2 **Signifikanzanalyse**

Die Berechnung des Einflusses wird mit Hilfe einer Varianzanalyse berechnet. Für die Berechnung werden hierbei nicht die originalen Rauheitswerte verwendet, sondern deren Transformation, wie in Kapitel 6.2.3.1 beschrieben. Auf diese Weise sind die Voraussetzungen für die Anwendung der ANOVA erfüllt. [28, 39]

Für jeden Parameter werden jeweils alle Versuche mit der entsprechenden Parameterstufe aus allen drei Durchläufen zusammengetragen, unabhängig von den anderen Parametern. Dies entspricht bei dem verwendeten Versuchsplan 30 Werten pro Parameterstufe. Bei der Varianzanalyse ist das letztendliche Ergebnis der sogenannte F-Wert, der entsprechend Formel 6.4 berechnet wird. [28, 39]

**6.4**

$$F_{Prüf} = \frac{M\,SS_A}{M\,SS_R}$$

Die Werte M $SS_A$ und M $SS_R$ stellen die mittleren Quadratsummen zwischen und innerhalb der einzelnen Parameter dar. Sie setzen sich aus den Quadratsummen und den Freiheitsgeraden des Versuchsplans zusammen. [28, 39]

**6.5**

$$M\,SS_A = \frac{SS_A}{I-1}$$

6.6
$$M\,SS_R = \frac{SS_R}{N - I}$$

$SS_A$ beschreibt die Streuung zwischen den Parameterstufen und gibt an, wie stark die Mittelwerte der einzelnen Parameterstufen vom Gesamtmittelwert abweichen. Der Wert I bezeichnet die Anzahl Freiheitsgerade des Parameters. In diesem Fall ist I = 5, da die Parameter in fünf Stufen variiert wurden, ausgenommen des Parameters Feuchtigkeit bei dem I = 2 beträgt. $SS_R$ beschreibt die Streuung innerhalb der Parameterstufen und beinhaltet die Reststreuung, die durch unbekannte Wechselwirkungen zwischen zwei oder mehr Parametern ungeklärt bleibt. N beschreibt die Anzahl der Gesamtversuche, in diesem Fall N = 150. $SS_A$ und $SS_R$ werden gemäß den Formeln 6.7 und 6.8 berechnet. [28, 39, 40]

6.7
$$SS_A = \sum_{i=1}^{I} n_i(\,\bar{y}_i - \,\bar{y})^2$$

6.8
$$SS_R = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{n_i}(y_{ij} - \,\bar{y}_i)$$

Der Wert $F_{Prüf}$ stellt die Signifikanz dar, die im Folgenden mit der Literatur verglichen werden kann. Anhand der Freiheitsgerade kann der gültige Wert für den vorliegenden Fall definiert werden. Liegt der Wert $F_{Prüf}$ oberhalb des Literaturwertes, kann mit einer 95%igen Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass der Einfluss des Parameters kein Zufall ist. Die Freiheitsgerade des Versuchsplans werden mit Hilfe von Formel 6.9 bestimmt. [28, 39, 40]

6.9
$$f_1 = I - 1;\; f_2 = N - I$$

Die Signifikanz wird durch gängige Statistik-Softwares auch als sogenannter p-Wert dargestellt. Der p-Wert gibt die Übertretungswahrscheinlichkeit dafür an, ob der berechnete $F_{Prüf}$-Wert zufällig auftritt, ohne dass der ausschlaggebende Faktor das Ergebnis in Wirklichkeit beeinflusst. Umso höher der p-Wert desto höher ist die Wahrscheinlichkeit für einen Fehler. Standardgemäß wird mit einer Signifikanzschwelle von 5 % gerechnet, sodass ein p-Wert kleiner 0,05 als signifikant gilt. [28, 39]

Die einzelnen Parameter werden im Folgenden auf ihre Signifikanz überprüft und der Einfluss jedes Parameters auf die Oberflächenrauheit wird analysiert. Da in diesem Zusammenhang mehrere Signifikanztests durchgeführt werden, steigt die Wahrscheinlichkeit für falsch-positive Tests stark an. "If you torture the data long enough, it will confess" [42] hat der Ökonom Ronald Coase passend beschrieben. Aus diesem Grund wird die Signifikanzschwelle angehoben, um

falsch-positive Tests zu reduzieren und die Auswertung robuster zu gestalten. Hierzu wird auf die p-Werte die sogenannte Bonferroni-Holm Korrektur angewendet. Bei der einfachen Bonferroni-Korrektur wird das Signifikanzniveau (normalerweise $\alpha = 0{,}05$) durch die Anzahl der Tests geteilt, sodass das neue Signifikanzniveau bei sieben Tests bei 0,007 liegt. Dies versichert, dass die Wahrscheinlichkeit einen Fehler zu begehen über alle Tests zusammen bei 5 % oder weniger liegt. Da die Bonferroni-Korrektur allerdings sehr konservativ ist, wird die Bonferroni-Holm-Korrektur ergänzend verwendet. Der erste Wert wird nach der normalen Bonferroni-Korrektur berechnet, d.h. mit einem $\alpha = 0{,}007$ im vorliegenden Fall. Darauffolgend wird die Grenze jeweils so berechnet, als wäre je ein Versuch weniger durchgeführt worden. [42]

**Tabelle 9** Ergebnis der Varianzanalyse. Einfluss der einzelnen Parameter auf die Oberflächenrauheit (bei 6,25 – 12,5 µm Wellenlänge) nach dem Laserpolieren mit angepasstem Signifikanzniveau nach Bonferroni-Holm.

| Parameter | Quadrat-summe | Freiheits-gerade | F-Wert | p-Wert | Signifikanz-niveau korrigiert |
|---|---|---|---|---|---|
| T | 15,89 | 4 | 12,51 | 1,40E-08 | 7,14E-03 |
| $v_{scan}$ | 12,27 | 4 | 9,66 | 7,81E-07 | 8,33E-03 |
| $d_L$ | 11,40 | 4 | 8,97 | 2,13E-06 | 1,00E-02 |
| $t_p$ | 3,33 | 4 | 2,62 | 3,79E-02 | 1,25E-02 |
| dy | 2,14 | 4 | 1,691 | 1,57E-01 | 1,67E-02 |
| n | 1,90 | 4 | 1,50 | 2,07E-01 | 2,50E-02 |
| F | 0,50 | 1 | 1,57 | 2,13E-01 | 5,00E-02 |
| Rest | 39,37 | 124 | | | |

Die Ergebnisse der Varianzanalyse für die durchgeführte Versuchsreihe sind in Tabelle 9 dargestellt. Angegeben sind für die jeweiligen Parameter die Quadratsumme, die Freiheitsgerade, der berechnete F-Wert sowie der p-Wert. Das Signifikanzniveau wurde durch die Bonferroni-Holm-Korrektur angepasst. Die Analyse wurde mit allen Parametern durchgeführt, sodass die Parameter nicht einzeln betrachtet wurden, dies ergibt einen großen Unterschied in sowohl dem F-Wert als auch der Restsumme, die den unerklärten Teil der Analyse darstellt. Wird beispielsweise die Temperatur ohne Berücksichtigung der anderen Parameter ausgewertet, beträgt deren F-Wert nur 8,04 statt 12,51 und die Restsumme beträgt 71,39 statt 39,37.

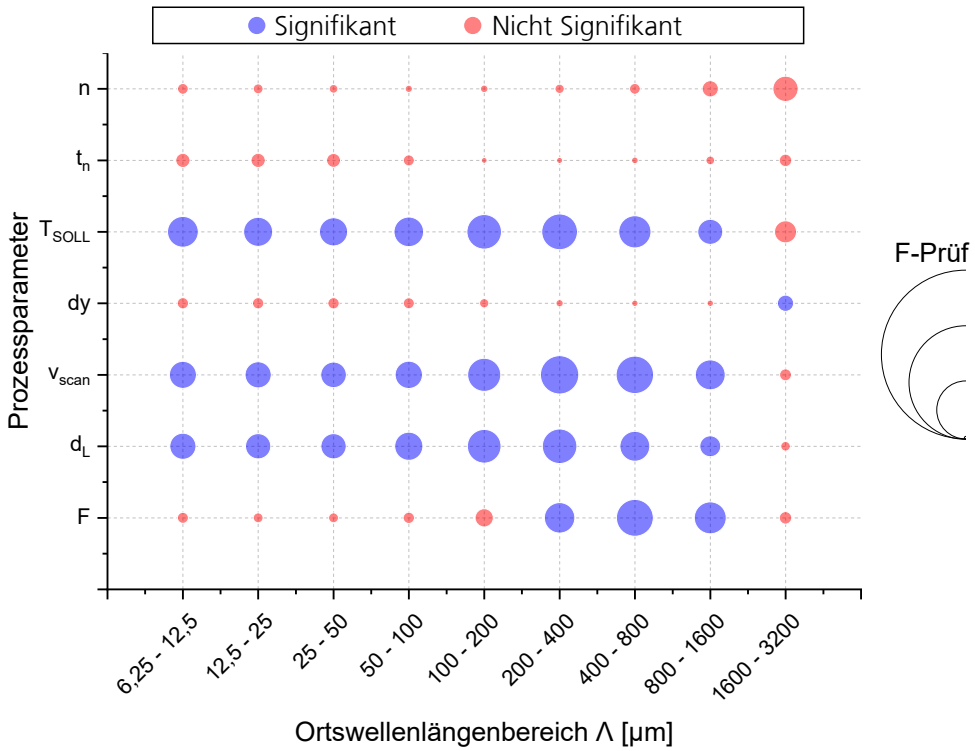



**Bild 26** Ergebnis der Varianzanalyse als Blasendiagramm. Aufgetragen sind die Prozessparameter über die verschiedenen Ortswellenlängen-bereiche. Die Größe der Blasen stellt den Wert F-Prüf dar und die Farbe, ob das Ergebnis signifikant ist (blau) oder unterhalb der Schwelle liegt (rot)

Das Ergebnis ist in Bild 26 in einem Blasendiagramm für alle Ortswellenlängenbereiche der Rauheit dargestellt. Die Parameter Anzahl der Überfahrten n, Pausenzeit $t_p$ und Spurüberlagerung dy werden durch die Varianzanalyse als nicht signifikant analysiert. Die Parameter Zieltemperatur $T_{SOLL}$, Scangeschwindigkeit $v_{scan}$ und der Laserstrahldurchmesser $d_L$ werden als signifikant gewertet. Die Feuchtigkeit wird für kurze Ortswellenlängen bis 200 µm als nicht signifikant errechnet und danach als signifikant. Im Folgenden werden die Einflüsse und der Einfluss der einzelnen Parameter separat beschrieben.

### 6.2.3.3 Einfluss der Zieltemperatur $T_{SOLL}$ auf die Oberflächenrauheit Sa

Der Einfluss der einzelnen Parameter wird zum einen anhand der Rauheitsreduktion dargestellt und zum anderen wird die zuvor errechnete Signifikanz genauer erläutert mit Hilfe eines Post-Hoc Tests. Der Vorgang wird am Beispiel der Zieltemperatur erläutert, für die restlichen Parameter werden nur die Ergebnisse angegeben.

Die Zieltemperatur $T_{SOLL}$ ist ein wesentlicher Einflussparameter der Oberflächenspannung sowie der Viskosität und damit der Fließeigenschaft des Schmelzbads. In Kapitel 5 wurde die Hypothese aufgestellt, dass die

Zieltemperatur einen Einfluss auf den Prozess hat und die Oberflächenrauheit bei steigender Temperatur sinkt. Dass die Temperatur einen Einfluss auf das Rauheitsergebnis hat, wird durch die oben gezeigte Varianzanalyse bestätigt.

Die Varianzanalyse gibt Aufschluss darüber, ob der Parameter im Vergleich zu den anderen verwendeten Parametern signifikant ist oder nicht. Hierbei wird aber nicht klar, ob die beobachtete Veränderung eines Wertes einen kausalen Zusammenhang aufweist. Um dies zu verdeutlichen, wird ein nachgeführter Post-Hoc Test durchgeführt. In diesem Fall wurde der sogenannte Tukey-Test verwendet. Der Tukey-Test führt einen gruppenweisen Vergleich durch und vergleicht die verschiedenen Stufen miteinander, um deren Unterschied herauszustellen. Im Einzelnen werden die Unterschiede zwischen Teilmengen und Mittelwerten unter Verwendung von Stichprobenmengen untersucht. Der Tukey-Test berechnet und analysiert alle paarweisen Vergleiche zwischen den Mittelwerten. Wenn das Ergebnis das Niveau $\alpha = 0{,}05$ überschreitet, wird die Hypothese, dass ein kausaler Unterschied zwischen den Gruppen existiert, abgelehnt. Hierbei ist MSE der Fehler der mittleren Quadrate, $\bar{Y}$ beschreibt die Menge der Mittelwerte und $\tilde{n}$ die Anzahl von Versuchen in allen Parameterstufen. Formel 6.10 beschreibt den Fall für einen balancierten Versuchsplan, in dem die Anzahl Versuche n für alle Parameter gleich ist. [43, 44]

**6.10**

$$p_{Trucey} = \frac{\bar{Y}_{max} - \bar{Y}_{min}}{\sqrt{\frac{MSE}{\tilde{n}}}}.$$

Das Ergebnis des Tukey-Tests gibt an, welche der Stufen zu den jeweils anderen signifikant unterschiedlich sind, sodass Zufallsunterschiede ausgeschlossen werden können zu einem Niveau von $\alpha = 5$ %.

Die Ergebnisse der Polierversuche für die Zieltemperatur sind in Bild 27 in Form eines Box-Plots dargestellt. Vertikal ist die Flächenrauheit Sa aufgetragen und horizontal die Zieltemperatur $T_{SOLL}$ in den verschiedenen Stufen. Exemplarisch sind zwei Ortswellenlängenbereiche, 6,25 – 12,5 µm und 400 – 800 µm dargestellt. Der Medianwert ist in beiden Fällen bei 200 °C am höchsten und nimmt bei den höheren Temperaturen stark ab. Im kurzen Wellenlängenbereich nimmt der Medianwert der Flächenrauheit bei steigenden Temperaturen nicht weiter ab. Lediglich die Streuung der Flächenrauheit wird reduziert. Im großen Ortswellenlängenbereich nimmt der Medianwert ebenfalls nicht weiter ab, sondern schwankt zwischen 1 – 2 µm. Die Streuung sinkt im Gegensatz zum kleinen Ortswellenlängenbereich nicht mit steigender Temperatur. Dieser Zusammenhang ist für die weiteren Wellenlängenbereiche ebenfalls zu beobachten. Die Streuung nimmt ab ca. 100 µm Ortswellenlänge zu. Betrachtet man anstatt des Mittelwerts den Minimal erreichten Flächenrauheitswert ist zu

sehen, dass im niedrigen Ortswellenlängenbereich für alle Temperaturbereiche eine ähnliche Flächenrauheit erzielt werden kann. Im hohen Ortswellenlängenbereich dagegen wird für 200 °C eine höhere Flächenrauheit erzielt als für die höheren Temperaturen, wobei die Flächenrauheit ab 320 °C wieder ansteigt.

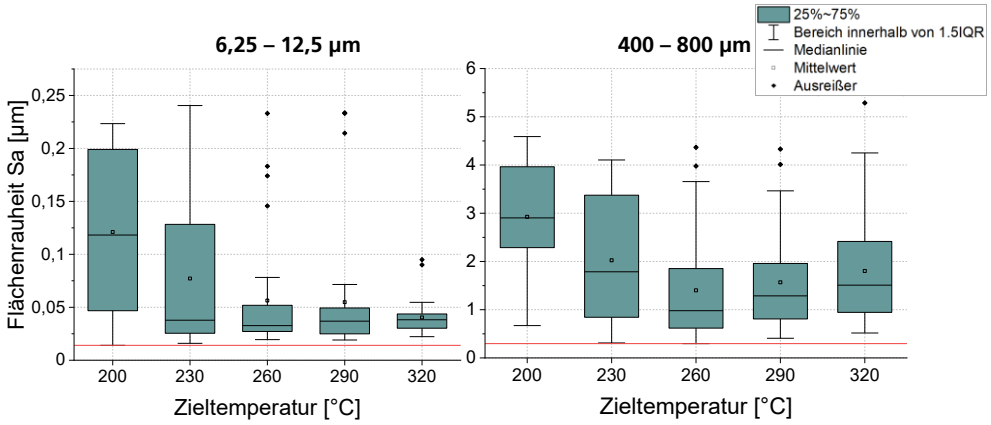



**Bild 27**
Flächenrauheit Sa in Abhängigkeit der Zieltemperatur $T_{SOLL}$ für 6,25 – 12,5 µm Ortswellenlänge (links) und 400 – 800 µm (rechts).

Der Post-Hoc Test, dargestellt in Tabelle 10, betrachtet die Mittelwerte der Datensätze und bestätigt die Beobachtung über den Medianwert. Einzig die Stufe 200 °C ist mit 95 % Wahrscheinlichkeit signifikant unterschiedlich zu allen anderen Stufen. Das bedeutet, der Unterschied von beispielsweise 260 °C zu 290 °C ist nicht signifikant und kann dem Zufall geschuldet zu sein. Bei der geringsten Zieltemperatur von 200 °C befindet sich die Temperatur des Schmelzbads knapp über der Schmelztemperatur, sodass das Material zwar aufgeschmolzen ist, die Fließfähigkeit allerdings noch nicht ausreicht für eine Glättung. Obwohl die Oberflächenrauheit mit steigender Temperatur nicht weiter reduziert wird, nimmt die Streuung der Oberflächenrauheit im Mikrobereich ab, sodass die Temperatur kurz unter der Verbrennungstemperatur gewählt werden sollte.

**Tabelle 10** Ergebnis des Tukey-Tests zur Darstellung der statistischen Unterschiede innerhalb eines Parameters für die Zieltemperatur $T_{SOLL}$ für zwei Ortswellenlängen-bereiche (6,25 – 12,5 µm und 400 – 800 µm)

**6,25 – 12,5 µm**

| Signifikanzvergleich zwischen Stufen der Zieltemperatur $T_{SOLL}$ | | p_tukey |
|---|---|---|
| Stufe 1 [°C] | Stufe 2 [°C] | |
| 200 | 230 | 0.0311 |
| 200 | 260 | 0.001 |
| 200 | 290 | 0.001 |
| 200 | 320 | 0.001 |
| 230 | 260 | 0.619 |
| 230 | 290 | 0.56 |
| 230 | 320 | 0.1067 |
| 260 | 290 | 0.9 |
| 260 | 320 | 0.7989 |
| 290 | 320 | 0.858 |

Signifikant (α = 0,05)

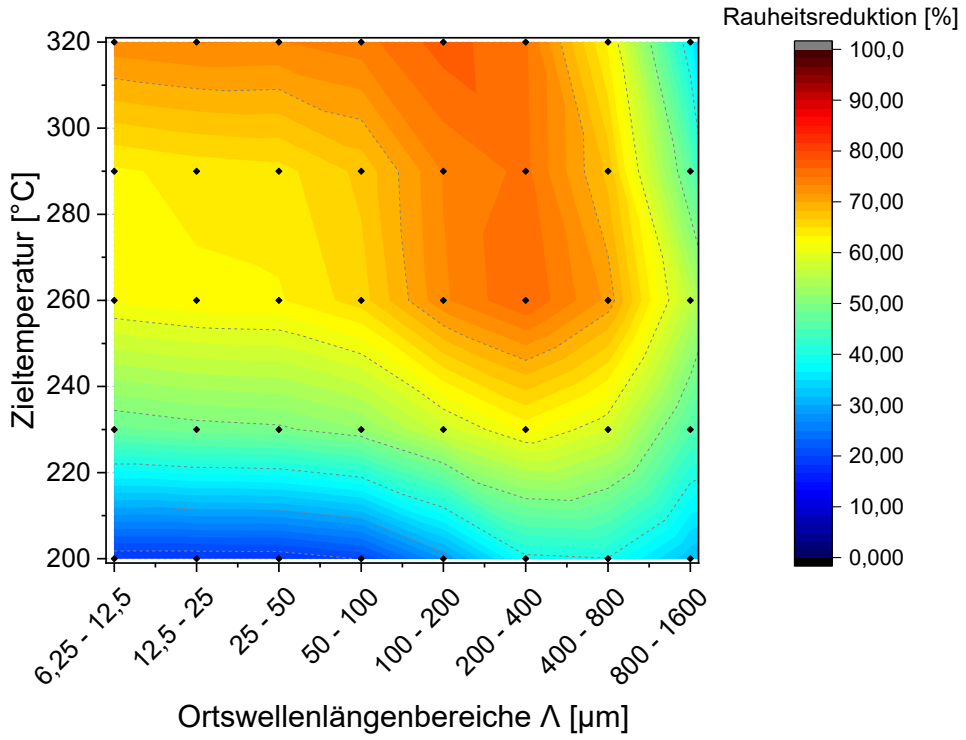
**400 – 800 µm**

| Signifikanzvergleich zwischen Stufen der Zieltemperatur $T_{SOLL}$ | | p_tukey |
|---|---|---|
| Stufe 1 [°C] | Stufe 2 [°C] | |
| 200 | 230 | 0.0252 |
| 200 | 260 | 0.001 |
| 200 | 290 | 0.001 |
| 200 | 320 | 0.0023 |
| 230 | 260 | 0.2353 |
| 230 | 290 | 0.5417 |
| 230 | 320 | 0.9 |
| 260 | 290 | 0.9 |
| 260 | 320 | 0.6487 |
| 290 | 320 | 0.9 |

Signifikant (α = 0,05)

Zur Verdeutlichung ist die Rauheitsreduktion über die Zieltemperatur und die verschiedenen Rauheitswellenlängen in Bild 28 dargestellt. Die Rauheits-reduktion ist die prozentuale Reduktion der Ausgangsrauheit durch den Polierprozess. Sollte die Endrauheit größer sein als die Ausgangsrauheit wurde die Rauheitsreduktion auf 0 % gesetzt. Dies kann auftreten, da der arithmetische Mittelrauheitswert aus einer Auswahl verschiedener Ausgangsproben berechnet wurde (siehe Kapitel 4.1.2) und die Endrauheit bei zu geringer Aufschmelzung der Probe höher sein kann als der Durchschnitt.

**Bild 28**
Rauheitsreduktion über die Zieltemperatur und verschiedene Ortswellenlängen-bereiche

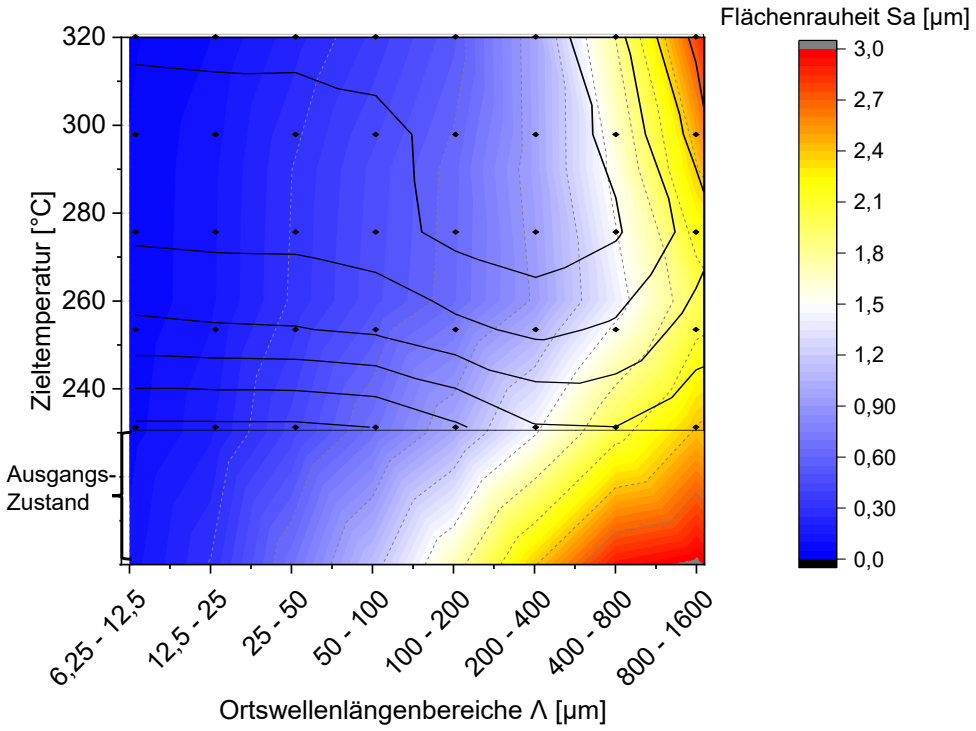



Laut Literatur soll die größte Rauheitsreduktion knapp unter der Verbrennungstemperatur des Kunststoffs liegen und jederzeit oberhalb der Schmelztemperatur [13, 16]. Für PA12 beträgt die Schmelztemperatur 180 °C und die Verbrennungstemperatur über 465 °C [31, 45]. Dementsprechend sollte die beste Rauheitsreduktion bei der vierten oder fünften Temperaturstufe bei 290/320 °C erreicht werden.

In der Versuchsreihe wurde eine maximale Rauheitsreduktion (bei 100 – 200 µm Ortswellenlänge) von 77,5 % bei einer Zieltemperatur von 320 °C erreicht. Bei Ortswellenlängen von 100 – 800 µm werden ähnliche Rauheitsreduktionen um 75 – 80 % auch bei niedrigeren Temperaturen bis runter zu 260 °C erreicht. Die Betrachtung der Flächenrauheit im Vergleich zur Rauheitsreduktion gibt Aufschluss über dieses Phänomen.

**Bild 29**
Flächenrauheit Sa über die Zieltemperatur und verschiedene Ortswellenlängen-bereiche.

Die Bereiche der Rauheitsreduktion (siehe Bild 28) sind als Linien-Overlay dargestellt.

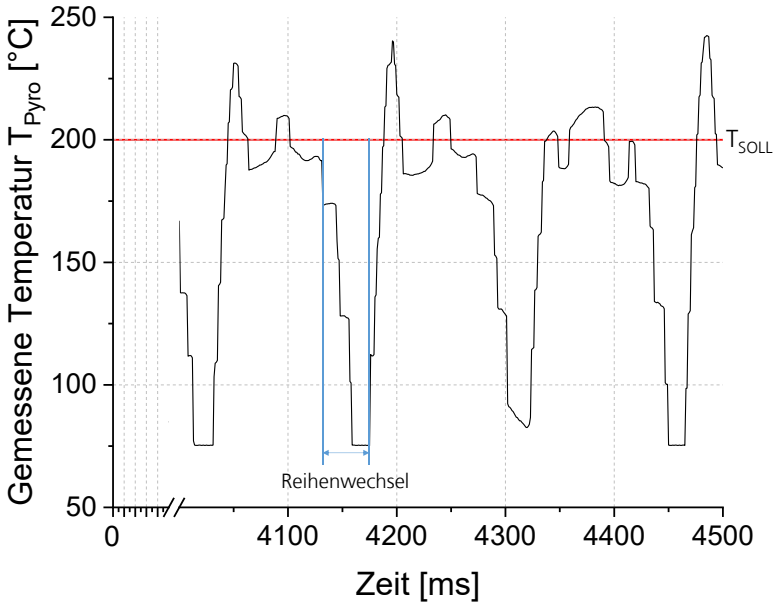



In Bild 13 ist die Ausgangsrauheit der SLS-gefertigten Proben über die Ortswellenlängen dargestellt. Dies zeigt, dass die Flächenrauheit Sa bei Ortswellenlängen von 100 – 800 µm um eine Potenz höher ist als bei den niedrigeren Ortswellenlängen. Das Potenzial zur Reduktion der Oberflächen-rauheit ist hier dementsprechend höher. In diesem Bereich wird daher auch eine größere Rauheitsreduktion erreicht. Dies wird im Vergleich der Rauheitsreduktion mit der erzielten Flächenrauheit Sa deutlich. In Bild 29 ist die erzielte Flächenrauheit Sa über die Zieltemperatur und die Ortswellenlängen abgebildet. Die erzielte Rauheitsreduktion wurde anhand der Bereichslinien aus Bild 28 über das Diagramm gelegt. Die Ausgangsflächenrauheit ist im unteren Teil des Diagramms dargestellt. Im Diagramm ist zu erkennen, dass die Rauheit mit steigender Ortswellenlänge insgesamt zunimmt und dass, trotz der höheren Rauheitsreduktion, die Rauheit bei 100 µm – 800 µm nicht auf einen geringeren Wert reduziert wird als bei den niedrigen Ortswellenlängen. Dennoch ist zu erkennen, dass die Rauheit für hohe Temperaturen stärker reduziert wird als bei niedrigen Temperaturen. Im niedrigen Ortswellenlängenbereich wird deutlich, dass die Höhe der Temperatur kaum einen Einfluss auf die Flächenrauheit hat. Mit 230 – 300 °C werden zwar Rauheitsreduktionen von rund 70 % erreicht, allerdings entspricht diese Reduktion einer Flächenrauheit von weniger als 1 µm. Eine eindeutige Rauheitsreduktion wird erst ab einem Ortswellenlängenbereich von 12,5 – 25 µm erreicht. Dies bestätigt auch die Erkenntnis aus Bild 27, dass

die minimal erzeugte Rauheit sich für verschiedene Temperaturen bei 6,25 – 12,5 µm Ortswellenlänge nicht relevant unterscheidet.

Für die Flächenrauheit bei Ortswellenlängen größer als 800 µm wird eine geringere Rauheitsreduktion erzeugt. Eine Begründung hierfür kann sein, dass die im Versuchsplan gewählten Laserstrahldurchmesser zum Großteil weit unter diesem Bereich liegen und durch den Überlapp der Spuren zu große Randeffekte auftreten, die zu Welligkeit führen können. Die verwendeten Laserstrahldurchmesser von 1500 – 3000 µm decken diesen Welligkeitsbereich zwar ab, aber wie in Kapitel 3.2.1 erklärt, sollte der Laserstrahldurchmesser nicht zu groß gewählt werden, da umso größer der Laserstrahldurchmesser ist, desto größer sind die Bewegungen innerhalb des Schmelzbades. Dies kann ebenfalls zu einer höheren Welligkeit führen. Der Einfluss des Laserstrahldurchmessers wird in Kapitel 6.2.3.4 betrachtet.

**Bild 30**
Temperaturverlauf beim Laserpoliervorgang mit drei Überfahrten mit einer Zieltemperatur von 200 °C




Die Zieltemperatur kann von der realen Temperatur abweichen (siehe Kapitel 4.2.3). Zum Vergleich ist in Bild 30 der mit dem Pyrometer gemessene Temperaturverlauf eines Versuchs mit 200 °C Zieltemperatur dargestellt. Durch die unidirektionale Bearbeitungsstrategie fährt die mechanische Achse zwischen den einzelnen Bahnen zurück zum Anfangspunkt. Auf dem Rückweg wird die Temperatur ebenfalls aufgenommen, während der Laser ausgeschaltet ist, was innerhalb einer Überfahrt zu einer Abnahme der Temperatur zwischen den Reihen führt. Die Temperaturen während der Bearbeitung befinden sich zwischen 180 und 230 °C, wobei die maximale Temperatur immer nur kurz durch den Überschwinger des PID-Reglers entsteht. Insgesamt befindet sich die

gehaltene Bearbeitungstemperatur bei knapp unter 200 °C. Die reale Temperatur ist durch den verfälschten Emissionsgrad tendenziell geringfügig niedriger [13, 16].

### 6.2.3.4 **Einfluss des Laserstrahldurchmessers**

Der Laserstrahldurchmesser $d_L$ ist laut der Varianzanalyse (siehe Kapitel 6.2.3.2, Bild 26) ein signifikanter Faktor bzgl. der Oberflächenrauheit beim Laserpolieren. Der direkte Einfluss des Strahldurchmessers ist für zwei Rauheitsortswellenlängen als Beispiel in Bild 31 dargestellt. Bei der Politur der Mikrorauheit fällt auf, dass der Mittelwert der Flächenrauheit mit steigendem Laserstrahldurchmesser ansteigt. Die Streuung nimmt bei kleinem Laserstrahldurchmesser ab.

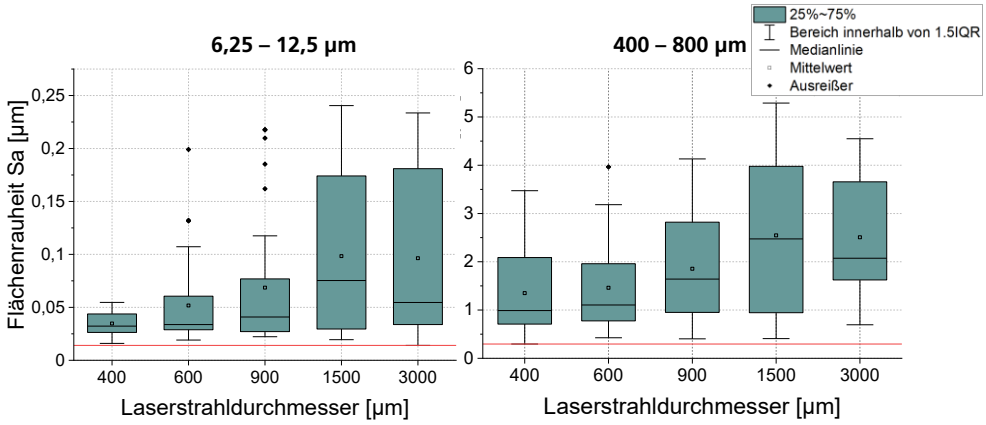



**Bild 31**
Flächenrauheit Sa in Abhängigkeit des Laserstrahldurchmessers $d_L$ für 6,25 – 12,5 µm Ortswellenlänge (links) und 400 – 800 µm (rechts).

Bei der Makrorauheit ist ein Ansteigen der Flächenrauheit bei steigendem Laserstrahldurchmesser ebenfalls zu erkennen. Bei einem kleinen Laserstrahldurchmesser wird die Streuung allerdings nicht reduziert. Bei der Betrachtung der minimal erreichten Flächenrauheit Sa ist zwischen den einzelnen Stufen des Laserstrahldurchmessers wenig Unterschied zu erkennen. Anders als bei der Zieltemperatur ist dieses Verhalten auch bei der Makrorauheit zu erkennen, was zeigt, dass beim Laserstrahldurchmesser in Kombination mit geeigneten Parametern mit allen Stufen gute Ergebnisse erzielt werden können. Einzig bei hohen Ortswellenlängen steigt die minimal erreichte Flächenrauheit um 0,5 µm an. Das Ergebnis des Post-Hoc Tests ist in Tabelle 11 dargestellt. Dieses zeigt, dass die Laserstrahldurchmesser 400 µm und 600 µm signifikant unterschiedlich sind zu den hohen Laserstrahldurchmessern 1500 µm und 3000 µm. Die Flächenrauheit von 900 µm zu 1500 µm oder höheren Laserstrahldurchmessern verändert sich nicht signifikant.

Werden die Ergebnisse nach dem Mittelwert ausgewertet, wird mit kleineren Laserstrahldurchmessern eine geringere Flächenrauheit erzeugt mit abnehmender Streuung. Im Vergleich von 400 µm zu 900 µm ergibt sich kein

statistisch signifikanter Unterschied, sodass bei PA12 ein mittlerer Laserstrahldurchmesser gewählt werden kann, um die Effizienz des Prozesses zu steigern.

**Tabelle 11** Ergebnis des Tukey-Tests zur Darstellung der statistischen Unterschiede innerhalb eines Parameters für den Laserstrahldurchmesser $d_L$ für zwei Ortswellenlängenbereiche (6,25 – 12,5 µm und 400 – 800 µm)

**6,25 – 12,5 µm**

| Signifikanzvergleich zwischen Stufen des Laserstrahldurchmessers dL | | p_tukey |
|---|---|---|
| Stufe 1 [µm] | Stufe 2 [µm] | |
| 400 | 600 | 0.7799 |
| 400 | 900 | 0.1845 |
| 600 | 900 | 0.7808 |
| 1500 | 400 | 0.001 |
| 1500 | 600 | 0.0237 |
| 1500 | 900 | 0.3055 |
| 1500 | 3000 | 0.9 |
| 3000 | 400 | 0.001 |
| 3000 | 600 | 0.034 |
| 3000 | 900 | 0.376 |

Signifikant (α = 0,05)

**400 – 800 µm**

| Signifikanzvergleich zwischen Stufen des Laserstrahldurchmessers dL | | p_tukey |
|---|---|---|
| Stufe 1 | Stufe 2 | |
| 400 | 600 | 0.9000 |
| 400 | 900 | 0.4575 |
| 600 | 900 | 0.6671 |
| 1500 | 400 | 0.0011 |
| 1500 | 600 | 0.0042 |
| 1500 | 900 | 0.1571 |
| 1500 | 3000 | 0.9000 |
| 3000 | 400 | 0.0018 |
| 3000 | 600 | 0.0064 |
| 3000 | 900 | 0.2042 |

Signifikant (α = 0,05)

Die Rauheitsreduktion über den Laserstrahldurchmesser $d_L$ und die Ortswellenlängen sind in Bild 32 gezeigt. Bei kleinem Laserstrahldurchmesser werden im Mittel deutlich größere Rauheitsreduktionen erreicht als mit großen Durchmessern. Bei einem Durchmesser von 400 µm wird die maximale Reduktion von 83 % erreicht (bei 100 µm – 200 µm). Wie bereits bei der Zieltemperatur beobachtet, wird eine höhere Rauheitsreduktion im Wellenlängenbereich von 100 – 800 µm erreicht. Dies deutet darauf hin, dass Rauheiten in diesem Wellenlängenbereich durch das Laserpolieren allgemein besser reduziert werden können als im niedrigeren oder höheren Bereich, wie bereits in Kapitel 6.2.3.3 erklärt.

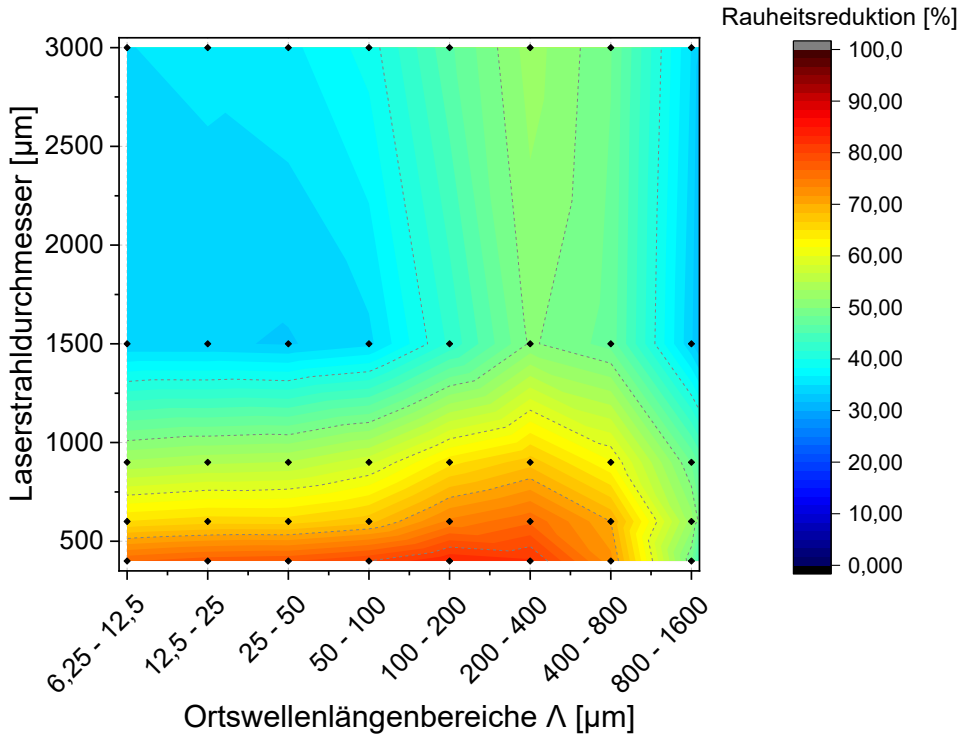



**Bild 32**
Rauheitsreduktion über den Laserstrahldurchmesser und verschiedene Ortswellenlängenbereiche

Die Erkenntnis, dass niedrige Laserstrahldurchmesser zu geringerer Flächenrauheit führen, widerspricht der in Kapitel 5 aufgestellten Hypothese. Hier wurde erwartet, dass der Laserstrahldurchmesser möglichst groß gewählt werden sollte, da sonst eine hohe Welligkeit entsteht durch den auftretenden Marangoni-Effekt. Durch den Marangoni-Effekt wird das Material am Rand des Schmelzbads aufgeschoben und damit zu den Seiten gedrückt. Gerade im langen Wellenlängenbereich der Rauheit sollte dies daher zu einer Verschlechterung der Politur führen. Der Marangoni-Effekt ist hauptsächlich vom Temperaturgradienten abhängig, er benötigt allerdings eine Mindest-wechselwirkungszeit, um einen beeinflussbaren Effekt zu erzielen. Diese war bei den Parameterkonfigurationen, wie sie hier verwendet wurden, vermutlich nicht ausreichend, sodass dieser keinen Effekt auf die Rauheitsreduktion zu haben scheint. Die Ergebnisse zeigen, dass im Mittel zwar eine größere Rauheitsreduktion mit kleinen Laserstrahldurchmessern erreicht werden kann, die minimal erzeugte Rauheit ist aber für alle Laserstrahldurchmesser ähnlich. In Kapitel 3.2.1 wurde erklärt, dass die Qualität des Laserpolierens hauptsächlich von den Prozessgrenzen abhängig ist, die eingehalten werden müssen. Laut E. Willenborg sollte der minimale Laserstrahldurchmesser mindestens die halbe Wellenlänge der Oberflächenstruktur aufweisen [12]. Dies wird für alle Ortswellenlängen bis 800 µm gewährleistet. Einzig für die niedrigsten Laserstrahldurchmesser $d_L$ = 400 µm und $d_L$ = 600 µm ist dies für die zwei

höchsten Ortswellenlängenbereiche nur grenzwertig bis nicht gegeben. In diesem Bereich ist auch in den Ergebnissen eine niedrigere Rauheitsreduktion zu erkennen, obwohl hier ein höheres Potenzial durch die hohe Ausgangsrauheit gegeben ist. Dies zeigt, dass dieser Effekt auch bei Kunststoffen aufzutreten scheint, während E. Willenborg dies für Metalle definiert hat.

Für die Versuche wurde ein gaußförmiger Laserstrahl verwendet, dessen Intensität zum Rand hin abnimmt. Die Variation des Laserstrahldurchmessers wurde durch eine Defokussierung des Strahls erreicht. Bei einem kleinen Laserstrahldurchmesser ist der Temperaturgradient von der Mitte zum Rand des Strahls größer als bei einem defokussierten Strahl. Durch den großen Temperaturgradienten beim fokussierten Gaußstrahl wird ein höherer Oberflächenspannungsgradient erzeugt, der notwendig ist, um die Schmelze zu bewegen und eine Glättung zu erzeugen. Bei großen Strahldurchmessern ist der Oberflächenspannungsgradient niedriger, da der fokussierte Strahl einen geringeren Temperaturgradienten in Richtung des Rands aufweist. Aus diesem Grund kann bei kleinen Laserstrahldurchmessern eine bessere Glättung der Oberfläche erzielt werden als bei großen Laserstrahldurchmessern.

### 6.2.3.5 **Einfluss der Spurüberlagerung dy**

Der Parameter Spurüberlagerung dy hat keinen signifikanten Einfluss auf die Oberflächenrauheit, wie die Varianzanalyse zeigt (siehe Kapitel 6.2.3.2, Bild 26). Dieser Zusammenhang lässt sich auch durch die direkte Betrachtung der Flächenrauheit in Abhängigkeit der Spurüberlagerung erkennen, wie in Bild 33 gezeigt.

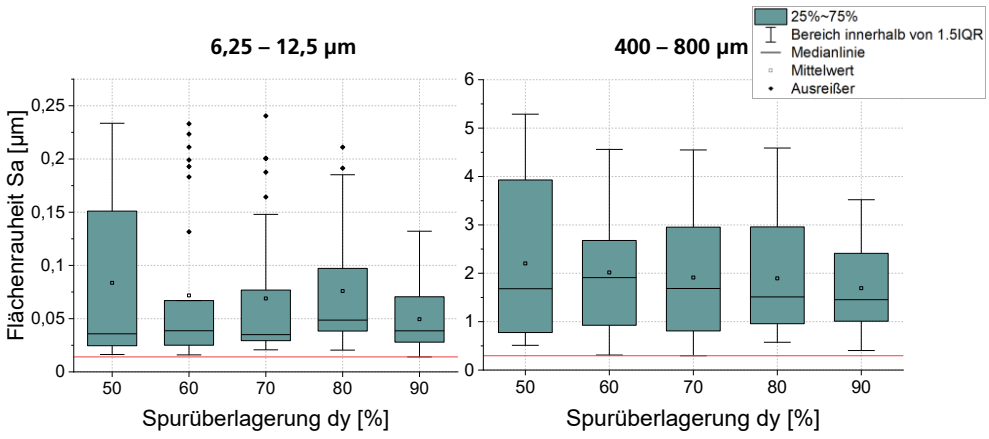
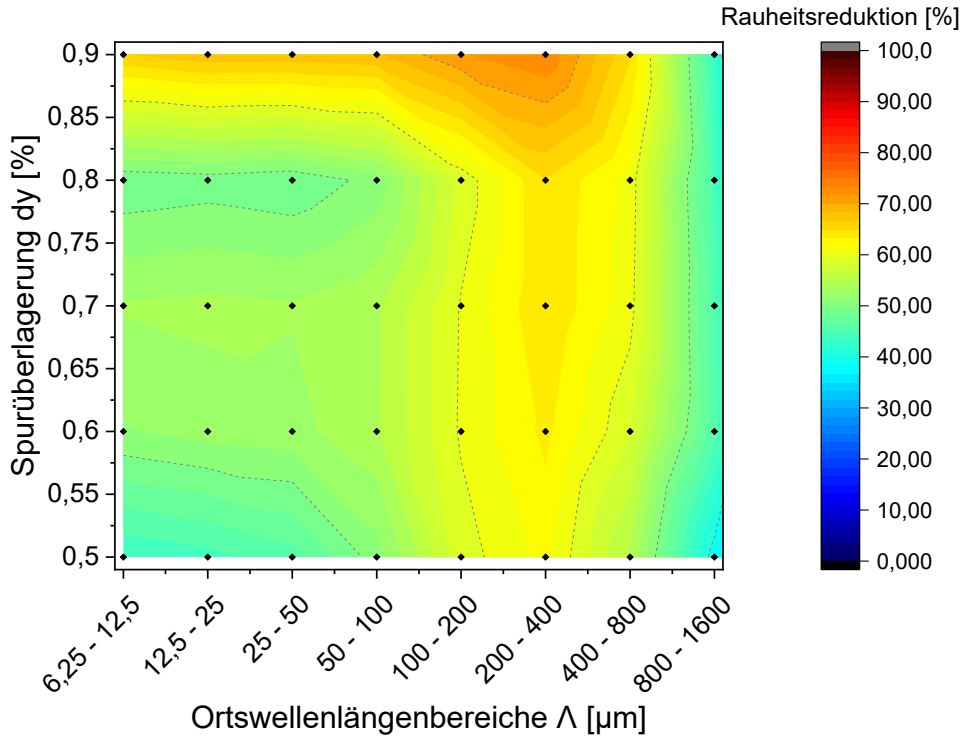



**Bild 33**
Flächenrauheit Sa in Abhängigkeit der Spurüberlagerung dy für 6,25 – 12,5 µm Ortswellenlänge (links) und 400 – 800 µm (rechts).

Der Medianwert sowie der Minimalwert der Flächenrauheit unterscheidet sich bei den verschiedenen Stufen der Spurüberlagerung wenig voneinander. Da der Parameter als nicht signifikant gewertet wurde, zeigt auch der Post-Hoc Test keinen signifikanten Unterschied zwischen den einzelnen Stufen an. Die Streuung bleibt bei allen Überlagerungen gleich groß.

Zum anderen wird dies über die Rauheitsreduktion deutlich, die in Bild 34 dargestellt ist. Die Rauheitsreduktion ist nahezu homogen für alle Ortswellenlängen. Zu beobachten ist aber wie zuvor, dass die Rauheitsreduktion bei 200 – 400 µm am höchsten ist. Für sehr hohe Überlagerungen von nahezu 90 % werden größere Rauheitsreduktionen erreicht, wie in der Falschfarbendarstellung zu erkennen ist. Die Änderung der Rauheitsreduktion zwischen den Stufen ist aber laut Statistik nicht signifikant.

**Bild 34**
Rauheitsreduktion über die Spurüberlagerung dy und verschiedene Ortswellenlängen-bereiche




Die Spurüberlagerung dy hat für gewöhnlich einen großen Einfluss, da diese bestimmt, wie häufig eine einzelne Position auf der Probe hintereinander bearbeitet wird. Bei einer großen Spurüberlagerung wird daher die Temperatur schnell ansteigen. Durch die verwendete Temperaturregelung wird dieser Effekt stark gemindert, da die Temperatur auf die Zieltemperatur angepasst wird und dadurch die Laserleistung entsprechend heruntergeregelt wird. In einem optimierten Temperaturregelungsprozess hat dy daher keinen großen Einfluss und kann zur Minimierung der Bearbeitungsdauer maximal gehalten werden. Wird nichtsdestotrotz die Probe im gesamten betrachtet und nicht nur lokal die Bearbeitungszone, trägt eine hohe Spurüberlagerung zu einer Erhöhung der Temperatur im gesamten Bearbeitungsfeld bei, was auch den geringen Anstieg der Rauheitsreduktion im oberen Bereich des Parameters verdeutlicht.

### 6.2.3.6 **Einfluss der Zeit zwischen den Überfahrten**

Die Zeit zwischen den Überfahrten dient ebenfalls zum Temperaturmanagement und hat wie zuvor die Spurüberlagerung bei einem temperaturgeregelten Prozess keinen relevanten Einfluss auf die Rauheit der Probe. Dies wurde sowohl durch die Varianzanalyse bestätigt (siehe Kapitel 6.2.3.2, Bild 26) als auch durch die Betrachtung der Flächenrauheit über die Zeit zwischen den Überfahrten.

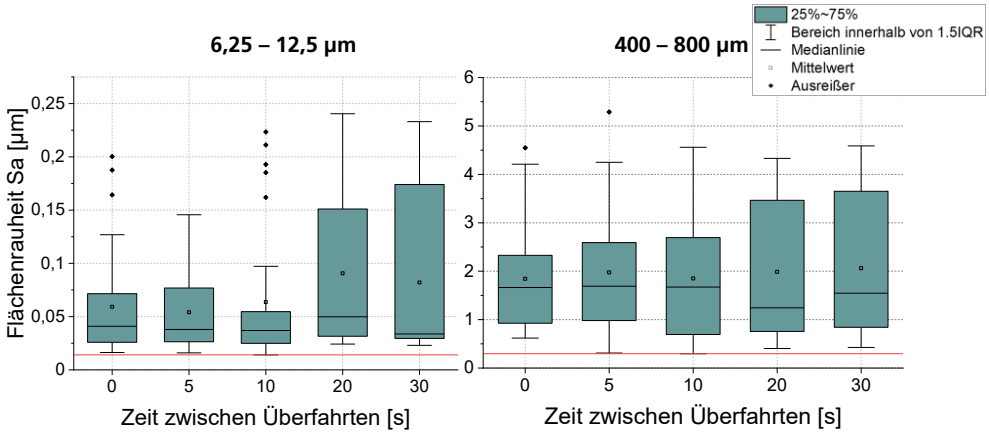



**Bild 35**
Flächenrauheit Sa in Abhängigkeit der Zeit zwischen Überfahrten $t_p$ für 6,25 – 12,5 µm Ortswellenlänge (links) und 400 – 800 µm (rechts).

Der Medianwert der Flächenrauheit bleibt über die verschiedenen Stufen nahezu gleich und die Streuung verändert sich ebenfalls nicht. Dies ist auch anhand der Rauheitsreduktion erkennbar in Bild 36. Erkennbar ist, dass die Rauheitsreduktion geringfügig zunimmt, wenn die Zeit zwischen den Überfahrten geringgehalten wird. Dies ist nachvollziehbar, da der Kunststoff bei längeren Pausenzeiten abkühlt und ggf. die schmelzflüssige Phase sich wieder verfestigt, bevor die nächste Bearbeitung stattfindet.

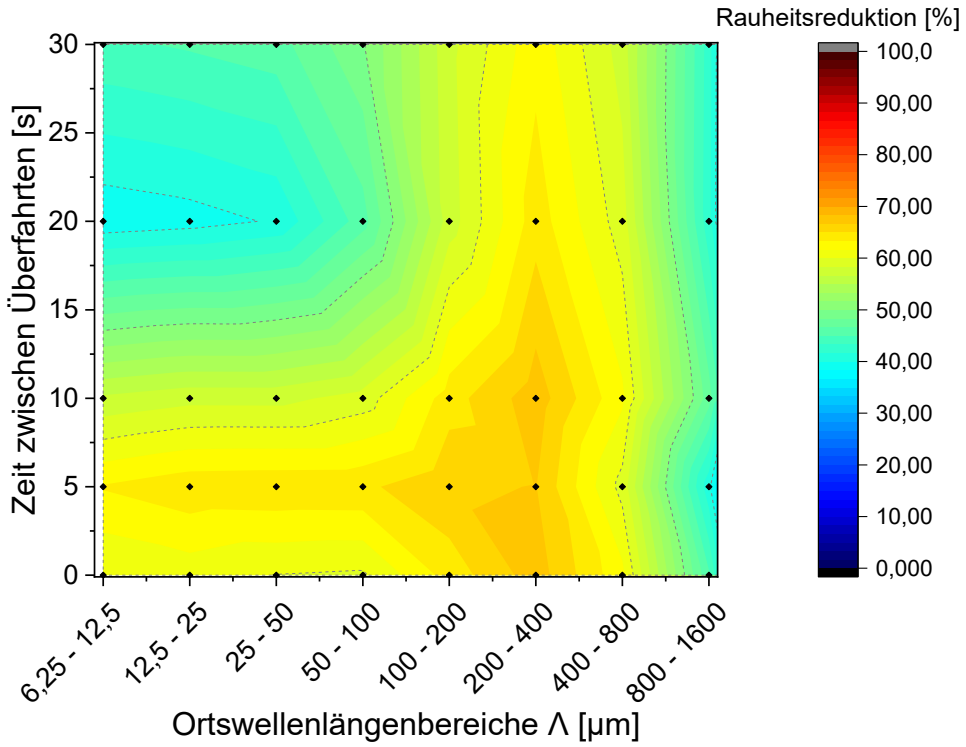



**Bild 36**
Rauheitsreduktion über die Zeit zwischen den Überfahrten $t_p$ und verschiedene Ortswellenlängen-bereiche

Ohne die Temperaturregelung würde die Temperatur über die Anzahl Überfahrten stetig steigen bei niedrigem $t_p$, allerdings wird dieser Effekt durch die Temperaturregelung verringert. Wie bei der Spurüberlagerung ist aber auch für die Zeit zwischen den Überfahrten eine geringfügige Verbesserung zu erkennen, wenn diese Zeit klein gewählt wird. Dies hängt ebenfalls mit der Erwärmung des gesamten Bearbeitungsfeldes zusammen, welches sich über die Zeit auch mit der Temperaturregelung aufwärmt. Wie bereits bei anderen Prozessparametern beobachtet, wurden im Wellenlängenbereich 100 – 400 µm bessere Ergebnisse erzielt als bei den anderen Ortswellenlängenbereichen.

### 6.2.3.7 **Einfluss der Feuchtigkeit**

Im Folgenden wurde der Unterschied zwischen getrockneten und nicht getrockneten Proben untersucht. Die Varianzanalyse (siehe Kapitel 6.2.3.2, Bild 26) zeigt, dass die Signifikanz der Probenfeuchtigkeit für Mikro- und Makrorauheit unterschiedlich ist. Für Ortswellenlängen bis 200 µm ist die Feuchtigkeit als nicht relevant berechnet und für alle Ortswellenlängen darüber gilt sie als signifikant.

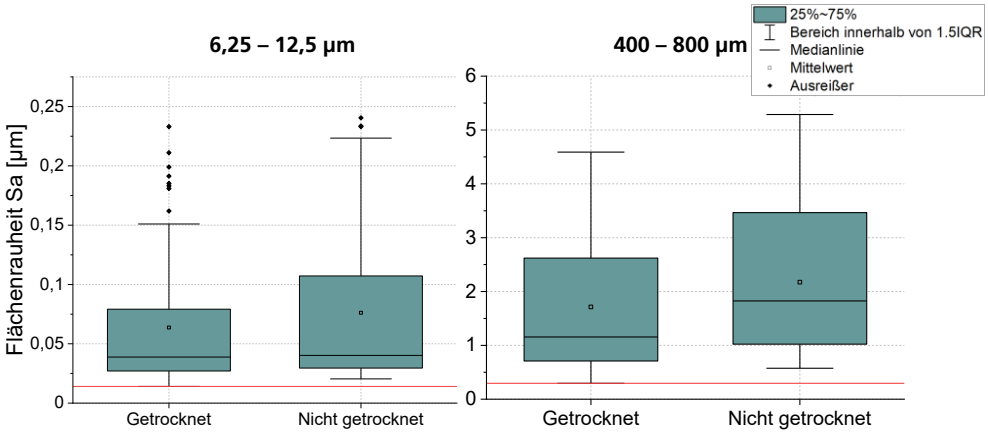



**Bild 37**
Flächenrauheit Sa in Abhängigkeit der Feuchtigkeit F für 6,25 – 12,5 µm Ortswellenlänge (links) und 400 – 800 µm (rechts).

In Bild 37 ist die Flächenrauheit dargestellt. Der Medianwert im Bereich der Mikrorauheit ändert sich durch das Trocknen nicht, allerdings ist der Mittelwert der getrockneten Proben leicht unter der Flächenrauheit der nicht getrockneten Proben. Im Bereich der Makrorauheit unterscheidet sich der Medianwert um knapp 1 µm. Auch der Minimalwert der Flächenrauheit ist für getrocknete Proben in beiden Ortswellenlängenbereichen niedriger. Die Rauheitsreduktion ist in Bild 38 dargestellt. Hier ist der Mittelwert der Rauheitsreduktion angegeben, der sich im Gegensatz zum Medianwert auch bei der Flächenrauheit bereits bei sowohl der Mikro- als auch der Makrorauheit unterschieden hat. Hier ist zu sehen, dass die mittlere Rauheitsreduktion bei getrockneten Proben stets um ca. 8 % höher ist als bei nicht getrockneten Proben. Aus diesem Grund sollten die Proben auch für die Reduktion von Mikrorauheit vorher getrocknet werden, auch wenn die Varianzanalyse in diesem Fall eine nicht ausreichende Signifikanz angibt.

Dieses Verhalten gilt für Polyamid 12 und ist für andere Kunststoffe nicht zu verallgemeinern. Dies ist von entscheidender Bedeutung, da unterschiedliche Kunststoffe verschiedene Veranlagungen zur Aufnahme von Wasser haben.

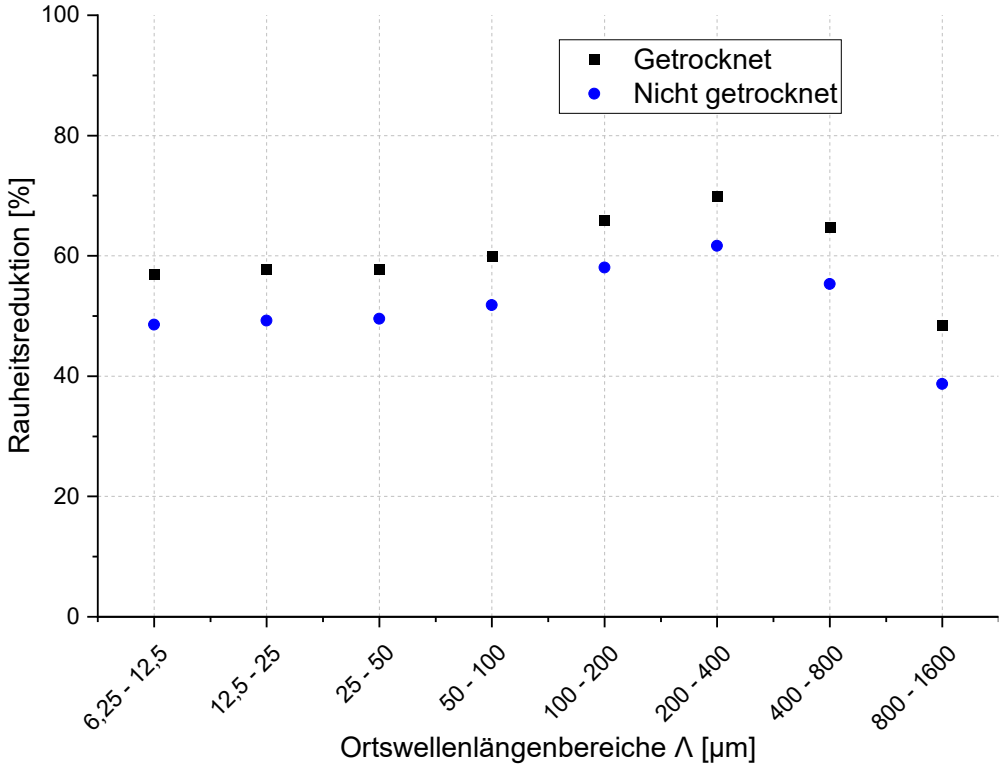



**Bild 38**
Rauheitsreduktion über den Trocknungszustand F für verschiedene Ortswellenlängen-bereiche

### 6.2.3.8 **Einfluss der Scangeschwindigkeit**

Die Scangeschwindigkeit ist bei Laserprozessen oft einer der einflussreichsten Prozessparameter. In diesem Fall wurde dies durch die Varianzanalyse (siehe Kapitel 6.2.3.2, Bild 26) bestätigt für sowohl Mikro- als auch Makrorauheit. Die Flächenrauheit ist in Bild 39 dargestellt. Für Mikrorauheit steigt der Medianwert der Flächenrauheit nur geringfügig an, wogegen der Mittelwert stark ansteigt. Die Streuung wird für Mikrorauheit bei geringen Scangeschwindigkeiten reduziert. Im Bereich der Makrorauheit steigen sowohl Mittelwert als auch Medianwert mit steigender Scangeschwindigkeit an. Der Minimalwert unterscheidet sich für die niedrigen Ortswellenlängenbereiche nicht erheblich. Bei hohen Ortswellenlängen dagegen ist zu sehen, dass der Minimalwert für hohe Scangeschwindigkeiten ansteigt.

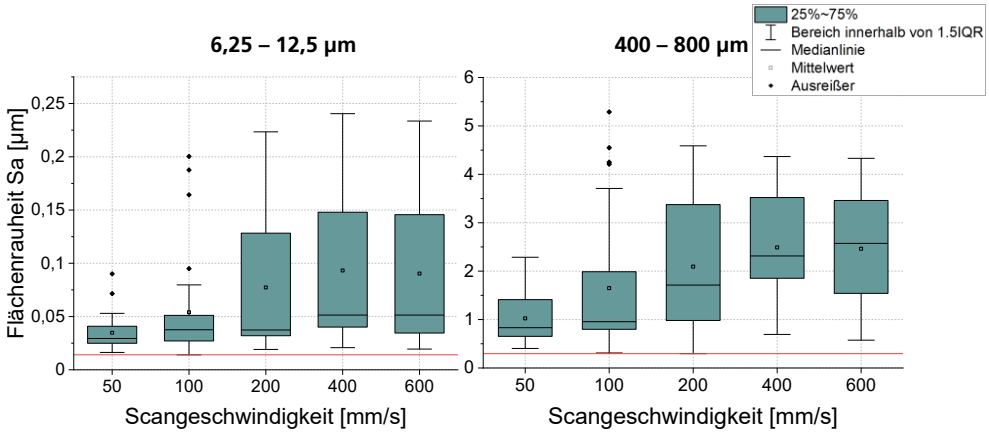



**Bild 39**
Flächenrauheit Sa in Abhängigkeit der Scangeschwindigkeit $v_{scan}$ für 6,25 – 12,5 µm Ortswellenlänge (links) und 400 – 800 µm (rechts).

Der Post-Hoc Test (siehe Tabelle 12) zeigt, dass der Unterschied von 50 mm/s auf 400 – 600 mm/s einen signifikanten Unterschied in der Flächenrauheit auslöst. Für Makrorauheit ist der Unterschied bereits ab 200 mm/s zu erkennen. Zusätzlich ist der Sprung von 100 mm/s zu 400 mm/s signifikant. Für die Wahl der Scangeschwindigkeit bedeutet dies, dass sie zur Reduktion der Flächenrauheit möglichst klein gewählt werden sollte. Da aber zwischen 50 – 100 mm/s kein signifikanter Unterschied erkennbar ist kann sie zur Steigerung der Effizienz auch größer als 50 mm/s gewählt werden. Wie groß sie gewählt werden kann, bevor die Flächenrauheit sichtbar abnimmt, müsste in einem detaillierteren Plan überprüft werden.

**Tabelle 12** Ergebnis des Tukey-Tests zur Darstellung der statistischen Unterschiede innerhalb eines Parameters für die Scangeschwindigkeit $v_{scan}$ für zwei Ortswellenlängen-bereiche (6,25 – 12,5 µm und 400 – 800 µm)

**6,25 – 12,5 µm**

| Signifikanzvergleich zwischen Stufen der Scangeschwindigleit $V_{scan}$ | | p_tukey |
|---|---|---|
| Stufe 1 [mm/s] | Stufe 2 [mm/s] | |
| 50 | 600 | 0.0046 |
| 100 | 50 | 0.704 |
| 100 | 200 | 0.5642 |
| 100 | 400 | 0.0948 |
| 100 | 600 | 0.1448 |
| 200 | 50 | 0.0556 |
| 200 | 400 | 0.8256 |
| 200 | 600 | 0.9 |
| 400 | 50 | 0.0024 |
| 400 | 600 | 0.9 |

Signifikant (α = 0,05)

**400 – 800 µm**

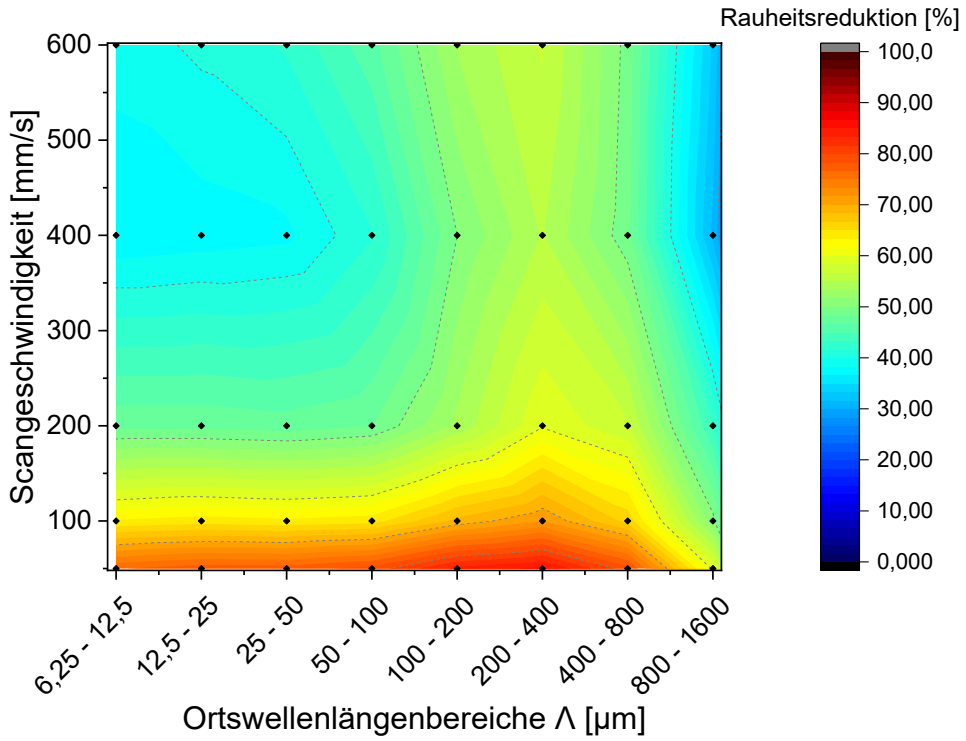
| Signifikanzvergleich zwischen Stufen der Scangeschwindigleit $V_{scan}$ | | p_tukey |
|---|---|---|
| Stufe 1 [mm/s] | Stufe 2 [mm/s] | |
| 50 | 600 | 0.001 |
| 100 | 50 | 0.2222 |
| 100 | 200 | 0.5583 |
| 100 | 400 | 0.0424 |
| 100 | 600 | 0.0533 |
| 200 | 50 | 0.0039 |
| 200 | 400 | 0.652 |
| 200 | 600 | 0.7008 |
| 400 | 50 | 0.001 |
| 400 | 600 | 0.9 |

Signifikant (α = 0,05)

In der Darstellung der Rauheitsreduktion in Bild 40 ist zu erkennen, dass bei niedrigen Scangeschwindigkeiten eine höhere Rauheitsreduktion erreicht wird als bei hohen Geschwindigkeiten. Im mittleren Wellenlängenbereich von 100 – 800 µm ist eine mittlere Rauheitsreduktion auch bei hohen

Geschwindigkeiten zu erkennen, wie bereits zuvor bei den anderen Parametern beobachtet wurde. Bei 50 mm/s wird eine maximale Rauheitsreduktion von 85,5 % erreicht (bei λ = 100 – 200 µm).

**Bild 40**
Rauheitsreduktion über die Scangeschwindigkeit $v_{scan}$ und verschiedene Ortswellenlängen-bereiche




### 6.2.3.9 **Einfluss der Anzahl Überfahrten**

Die Anzahl der Überfahrten soll von Überfahrt zu Überfahrt die Rauheit weiter reduzieren. Sie dient ebenfalls zum Temperaturmanagement und hat aufgrund der Temperaturregelung keinen direkten Einfluss auf die Rauheit der Probe. Dies wird sowohl durch die Varianzanalyse bestätigt (siehe Kapitel 6.2.3.2, Bild 26) als auch durch die Betrachtung der Flächenrauheit über die Anzahl der Überfahrten.

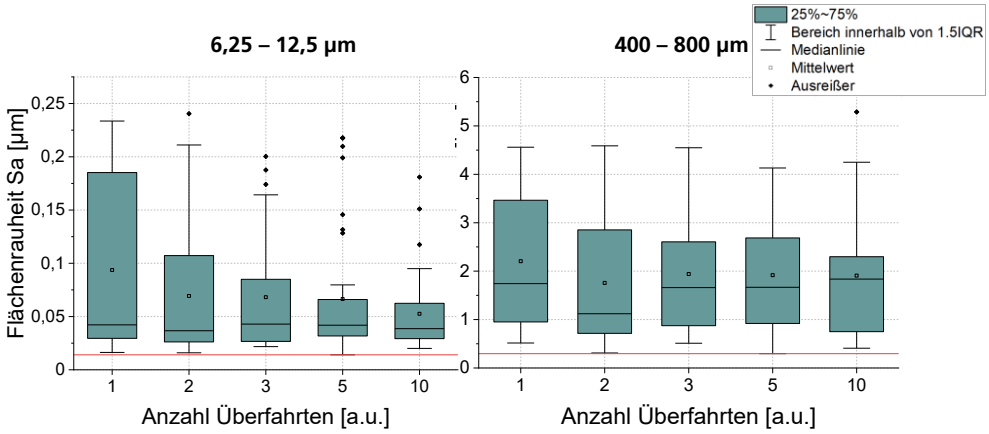
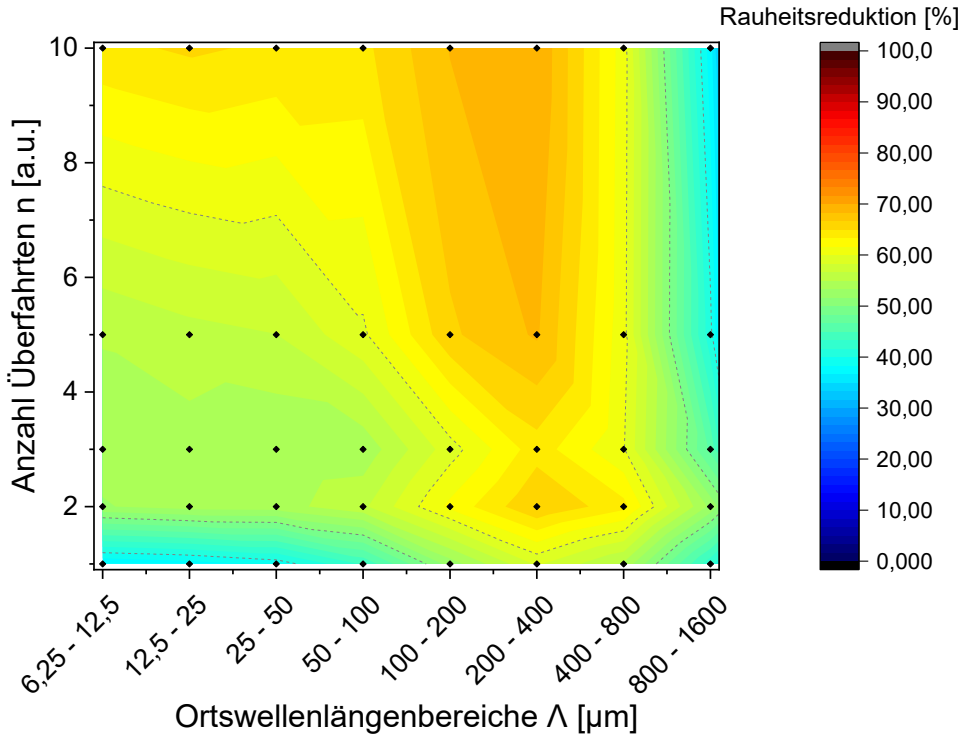



**Bild 41**
Flächenrauheit Sa in Abhängigkeit der Anzahl Überfahrten n für 6,25 – 12,5 µm Ortswellenlänge (links) und 400 – 800 µm (rechts).

Der Medianwert der Flächenrauheit bleibt über die verschiedenen Stufen nahezu gleich und die Streuung verändert sich ebenfalls nicht. Im Mikrorauheitsbereich werden die Fehlerbalken innerhalb des 1,5-fachen Interquartilsabstand (IQR) mit zunehmender Anzahl Überfahrten kleiner. Gleichzeitig steigt aber die Anzahl an Ausreißern, welche in der Darstellung als Boxplot als Werte oberhalb des 1,5-fachen IQRs definiert werden. Eine Abnahme der Streuung kann hier also nicht belegt werden. In Bild 42 ist erkennbar, dass die Rauheitsreduktion mit steigender Anzahl n um kleiner als zehn Prozent ansteigt. Wie bereits bei anderen Prozessparametern beobachtet, wurden im Wellenlängenbereich 100 – 400 µm bessere Ergebnisse erzielt als bei den anderen Ortswellenlängenbereichen. Für die Aufwärmung des gesamten Bearbeitungsfeldes hat die Anzahl der Überfahrten trotz der Temperaturregelung einen Einfluss.

**Bild 42**
Rauheitsreduktion über die Anzahl Überfahrten n und verschiedene Ortswellenlängen-bereiche




### 6.2.3.10 **Einfluss der Wechselwirkungszeit**

Die Wechselwirkungszeit $t_w$ ist kein direkt variierter Parameter, sondern berechnet sich aus den einstellbaren Parametern. Sie wird entsprechend Formel 3.2 für eine Überfahrt berechnet, wobei b und h als die Breite und Höhe des bearbeiteten Feldes definiert sind.

Die auf diese Weise berechnete Wechselwirkungszeit ist in Bild 43 im Zusammenhang mit den verschiedenen Rauheitsortswellenlängen und der Rauheitsreduktion dargestellt. Aufgrund der Vielzahl von unterschiedlichen Parameterkombinationen ergibt sich hier kein homogenes Bild, wie wenn die Wechselwirkungszeit als fester Parameter behandelt worden wäre. Die Wechselwirkungszeit ist logarithmisch dargestellt. Das Ergebnis zeigt, dass tendenziell hohe Wechselwirkungszeiten zu einer größeren Rauheitsreduktion führen. Auf der linken Seite ist die Wechselwirkungszeit der Parameterkombinationen für eine Überfahrt dargestellt und auf der rechten Seite die akkumulierte Wechselwirkungszeit für die Gesamtzahl der Überfahrten der verschiedenen Versuche.

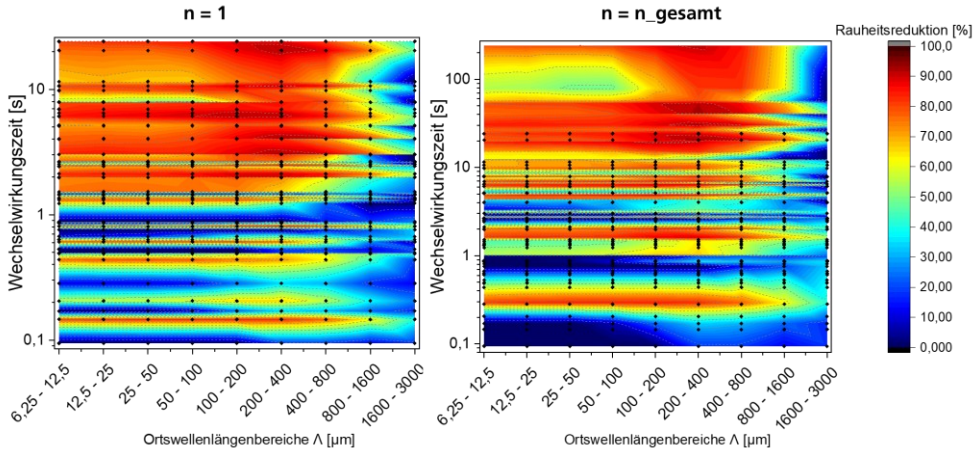



**Bild 43**
Rauheitsreduktion über die Wechselwirkungszeit $t_w$ und verschiedene Wellenlängen-bereiche für n=1 (links) und die akkumulierte Anzahl Überfahrten (rechts)

Die Wechselwirkungszeit und die Einhaltung der Prozessgrenzen werden in der Literatur zum Laserpolieren als größte Einflussgrößen beschrieben. In Bild 44 ist die Wechselwirkungszeit über die Zieltemperatur abgebildet. In dieser Darstellung ist die Flächenrauheit Sa farblich dargestellt. Diese Darstellung verdeutlicht, dass die niedrigste Rauheit bei hoher Wechselwirkungszeit erreicht wird, während die Temperatur bei rund 260 °C oder höher gewählt werden sollte.

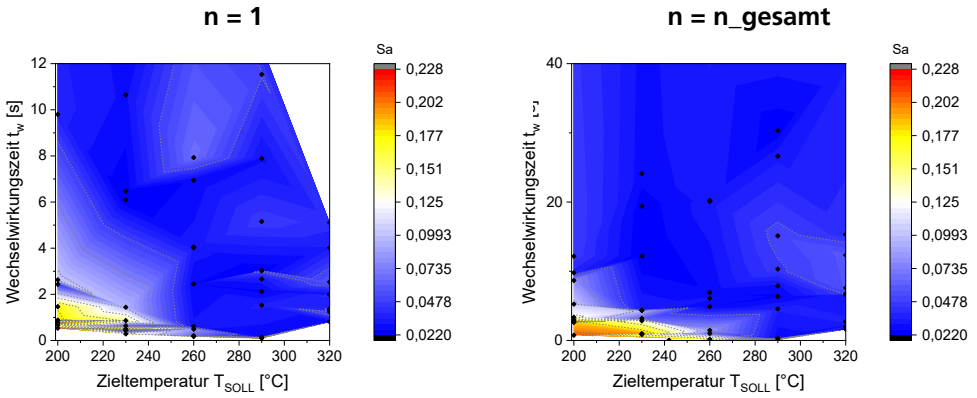



**Bild 44**
Flächenrauheit Sa über die Wechselwirkungszeit und die Zieltemperatur. Links ist die Wechselwirkungszeit über eine Überfahrt berechnet, Rechts ist die akkumulierte Wechselwirkungszeit angegeben über alle Überfahrten

Die Wechselwirkungszeit wurde bereits bei vorangegangen Untersuchungen als kritischer Parameter festgestellt. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass dies auch für PA12 zutrifft. Bei großen Wechselwirkungszeiten wird die Wärmeenergie tiefer in das Material geleitet, sodass ein homogenes Schmelzbad gebildet werden kann. Dies führt dazu, dass die Oberfläche bei der Erstarrung schließlich glatter wird als bei einer kurzen Wechselwirkungszeit. Bei geringen Wechselwirkungszeiten haben die Molekülketten der Kunststoffe mehr Zeit sich zu strecken und aneinander vorbeizugleiten, was zu einer besseren Fließfähigkeit

führt. Bei einer kurzen Wechselwirkungszeit können sich die Kunststofffäden nicht aus dem Knäuel lösen und gelangen nicht in eine geeignete schmelzflüssige Phase bevor sie wieder erstarren.

### 6.2.4 Fazit

Insgesamt lassen sich die Ergebnisse, die in der Versuchshypothese in Kapitel 5 festgelegt wurden, anhand der zweiten Versuchsreihe bestätigen. Eine Gegenüberstellung ist in Bild 45 gezeigt. Abweichungen existieren in der Anzahl der Überfahrten, der Probenfeuchtigkeit und dem Laserstrahldurchmesser.

Die Abweichung bei der Hypothese zu der Anzahl Überfahrten wurde bereits bei der Festlegung mit der Einschränkung getroffen, dass sie keinen großen Einfluss hat, solange die anderen Parameter in einem geeigneten Parameterbereich liegen. Insgesamt ließ sich durch die Erhöhung der Überfahrten lediglich eine Erhöhung der Rauheitsreduktion niedriger 10 % erreichen, was anhand der statistischen Auswertung als nicht signifikant definiert wurde.

Die Probenfeuchtigkeit wurde durch die Varianzanalyse nur für hohe Ortswellenlängen als signifikant bewertet, obwohl in der Hypothese erwartet wurde, dass eine erhöhte Feuchtigkeit immer zu einer geringeren Flächenrauheit führt. Die Varianzanalyse basiert auf der Änderung des Mittels und muss immer kritisch betrachtet werden. Die Änderung der Probenfeuchtigkeit hat laut Mittelwert immer für eine Verbesserung der Flächenrauheit von 8 % gesorgt, obwohl die Varianzanalyse nur einen signifikanten Unterschied in den großen Ortswellenlängenbereichen gezeigt hat. Dies gilt auch für den Minimalwert, der bei den Bearbeitungen erreicht wurde. Da die Reduktion von 8 % in der Flächenrauheit auch bei niedrigen Ortswellenlängen kontinuierlich aufgetreten ist, sollten die Proben vor der Bearbeitung getrocknet werden.

Die Ergebnisse zum Laserstrahldurchmesser sind denen der Hypothese gegensätzlich. Angenommen wurde, dass der Laserstrahldurchmesser möglichst groß gewählt werden sollte, um dem Marangoni-Effekt im hohen Ortswellenlängenbereich entgegenzuwirken. Allerdings hat sich bei den Versuchen herausgestellt, dass der Laserstrahldurchmesser für alle Ortswellenlängen möglichst klein gewählt werden sollte. Dies liegt vermutlich daran, dass der Prozess so schnell ausgeführt wird, dass das Aufwölben der Randbereich noch nicht auftritt. Im Gegenteil kann der Marangoni-Effekt in Anbetracht der Tatsache, dass die Temperatur den größten Einfluss beim Laserpolieren gezeigt hat, dafür sorgen, dass der Gradient der Oberflächenspannung erhöht wird und dadurch eine bessere Glättung erreicht werden kann. Im Rahmen der Ergebnisse haben sich möglichst kleine Laserstrahldurchmesser als geeignet erwiesen. Im Makrobereich der Rauheitsanalyse trifft die Voraussetzung, dass der Laserstrahldurchmesser mindestens die halbe Wellenlänge der Struktur aufweisen sollte, nicht für alle

Laserstrahldurchmesser zu. Im Ortswellenlängenbereich größer als 800 µm wurden insgesamt schlechtere Rauheitsergebnisse erzeugt, was auf diesen Fakt zurückgeführt werden könnte.

**Bild 45**
Gegenüberstellung der Versuchshypothese und der durch die Varianzanalyse gezeigten Einflussanalyse

| Parameter | | | Hypothese | Varianzanalyse |
|---|---|---|---|---|
| Anzahl Überfahrten | n | ↑ | Sa ↓ | → |
| Laserstrahldurchmesser | $d_s$ | ↑ | Sa ↓ | ↑ |
| Probenfeuchtigkeit | F | ↑ | Sa ↑ | ↗ |
| Pausenzeit | $t_P$ | ↑ | Sa → | → |
| Scangeschwindigkeit | $v_{scan}$ | ↑ | Sa ↑ | ↑ |
| Spurüberlagerung | dy | ↑ | Sa → | → |
| Zieltemperatur | $T_{Soll}$ | ↑ | Sa ↓ | ↓ |

Die Varianzanalyse zeigt, dass insgesamt die Temperatur den größten Einfluss auf den Laserpolierprozess aufweist. Direkt darauffolgend sind die Scangeschwindigkeit an zweiter Stelle und der Laserstrahldurchmesser an dritter Stelle. Der Laserstrahldurchmesser und die Scangeschwindigkeit sind weitestgehend für die Wechselwirkungszeit der Laserstrahlung mit dem Material verantwortlich und beeinflussen stark die Ausbildung des Schmelzbads. Hohe Wechselwirkungszeiten haben erfolgreich zu einer höheren Rauheitsreduktion beigetragen. Entgegen den Erwartungen aus der Literatur, die besagen, dass PA6 nahezu gar nicht zu polieren ist, zeigen die Untersuchungen an PA12, dass die Laserpolitur gut für den Werkstoff geeignet ist. Die Parameter, die sich relevant auf die Rauheitsreduktion auswirken, wurden eingeschränkt und stimmen grundsätzlich mit den bisherigen Erfahrungen aus der Literatur für andere Kunststoffe überein. Ebenso konnten Theorien, die für das Metallpolieren getroffen wurden, wie z.B. die Dimensionierung des Laserstrahldurchmessers, innerhalb der Versuche angewendet werden. Eine wichtige Erkenntnis aus den Versuchsreihen ist, dass die Zieltemperatur einen systematischen Einfluss auf die Reduktion der Oberflächenrauheit aufweist. Bei der Erzielung von Rauheit in großem Ortswellenlängenbereich können insgesamt andere Parameter geeigneter sein, um einen möglichst effizienten und streuungsarmen Prozess zu generieren, als im niedrigen Ortswellenlängenbereich.

Die Ergebnisse zeigen, dass im Bereich niedriger Ortswellenlänge eine geringere Rauheitsreduktion erreicht wurde als bei hohen Ortswellenlängen. Dies wurde in den Untersuchungen auf die Ausgangsvoraussetzung des Materials zurückgeführt. Im Bereich der Makrorauheit ist die Ausgangsrauheit Sa um eine Potenz höher als im Mikrobereich. Dies ermöglicht ein weit größeres Potenzial zur Rauheitsreduktion. Im größeren Wellenlängenbereich ab 800 µm wird die Rauheitsreduktion allerdings geringer, da die für das Laserpolieren geeigneten Prozessgrenzen nicht mehr eingehalten werden.

Die Betrachtung der Flächenrauheit bei den Ergebnissen zeigt, dass zwar im Bereich der Mikrorauheit eine hohe mittlere Rauheitsreduktion von weit über 70 % erzielt werden kann, welche aber einem Absolutwert weniger als 1 µm entspricht. Dies wird auch in der Betrachtung der Minimalwerte der Flächenrauheit sichtbar, da diese sich im Gegensatz zu den mittleren Werten nicht unterscheiden zwischen den einzelnen Parameterstufen. Dies lässt darauf schließen, dass mit allen Stufen eine geeignete Parameterkombination vorlag, sodass im Mikrobereich keine Unterschiede der Flächenrauheit erzielt werden innerhalb der verschiedenen Parameterstufen.

Die in der Literatur untersuchten Kunststoffe wurden unter grundlegend unterschiedlichen Voraussetzungen und mit verschiedenen Parametersätzen untersucht, sodass keine direkte Vergleichbarkeit hergestellt werden kann. Diese Untersuchungen zeigen aber, dass vor allem die Prozesstemperatur in Kombination mit der Wechselwirkungszeit und dem Ausgangszustand einen großen Einfluss auf das Polierergebnis hat. Sie kann dementsprechend im Zusammenhang mit der Fließfähigkeit des Materials als grundlegender Parameter zur Polierbarkeit der Kunststoffmaterialien gezählt werden. Im Folgenden sollen die, bisher in der Literatur untersuchten, Materialien daher auf ihre Fließfähigkeit untersucht und anschließend unter gleichen Voraussetzungen analysiert werden.

## 6.3 Einfluss der Viskosität auf das Laserpolieren

Die vorherigen Untersuchungen von PA12 sowie die Literatur zu anderen Materialien zeigen, dass die als signifikant identifizierten Prozessparameter einen direkten Einfluss auf die Fließeigenschaften der Schmelze haben. Die ausschlaggebende Größe der Fließeigenschaft ist die Viskosität. Im Folgenden soll untersucht werden, ob ein systematischer Zusammenhang zwischen der Viskosität und dem Laserpolierergebnis für verschiedene additiv gefertigte Kunststoffmaterialien vorliegt.

### 6.3.1 Probenmaterial zur Untersuchung des Einflusses der Viskosität

Als Probenmaterial wurden verschiedene Kunststoffarten, die bereits laut Literatur untersucht wurden (siehe Kapitel 3.2.2), in 3D-gedruckter Form beschafft, um sie auf ihre rheometrischen Eigenschaften zu untersuchen. Außerdem wurde die Flächenrauheit Sa für die unpolierten Proben bestimmt.

**Tabelle 13**
Auflistung der verwendeten Kunststoffarten unter Angabe der Fertigungsart und der gemessenen mittleren Flächenrauheit Sa

Messeinstellung Sa:
FOV: 5mmx5mm
Resolution:
3204 px x 3200 px

| Kunststoff | Fertigungsart | Mittlere Flächenrauheit Sa |
|---|---|---|
| ABS | FDM | 0,94 µm |
| PA6 | SLS | 2,40 µm |
| PA12 | SLS | 3,76 µm |
| PLA | FDM | 0,80 µm |
| PP | SLS | 2,10 µm |

Die Ausgangsrauheit der additiv gefertigten Bauteile ist in Bild 46 dargestellt. Aufgetragen ist die Flächenrauheit Sa über die Ortswellenlängenbereiche $\Lambda$. Die additiv gefertigten Kunststoffe wurden mit zwei verschiedenen Fertigungsverfahren hergestellt, FDM und SLS. Diese Verfahren erzeugen auf der Oberfläche der gefertigten Bauteile ein charakteristisches Rauheitsbild. Die Kunststoffe ABS und PLA wurden mittels FDM-Druck verarbeitet und weisen eine geringere Flächenrauheit auf als die SLS gedruckten Proben. Die Flächenrauheit Sa nimmt mit steigender Ortswellenlänge des Rauheitsfilters stetig zu. Die SLS-gedruckten Kunststoffe PA6, PA12 und PP weisen bis zu etwa 100 – 400 µm Ortswellenlänge einen Anstieg an Flächenrauheit auf, während sie bei größeren Ortswellenlängen sinkt. Für die weiterführenden Untersuchungen wird der Mittelwert der Flächenrauheit Sa für die verschiedenen Ortswellen-längenbereiche $\Lambda$ verwendet, um die Rauheitsreduktion durch das Laserpolieren zu ermitteln. In Tabelle 13 ist die mittlere Flächenrauheit über alle Ortswellenlängen angegeben für die jeweiligen Kunststoffproben.

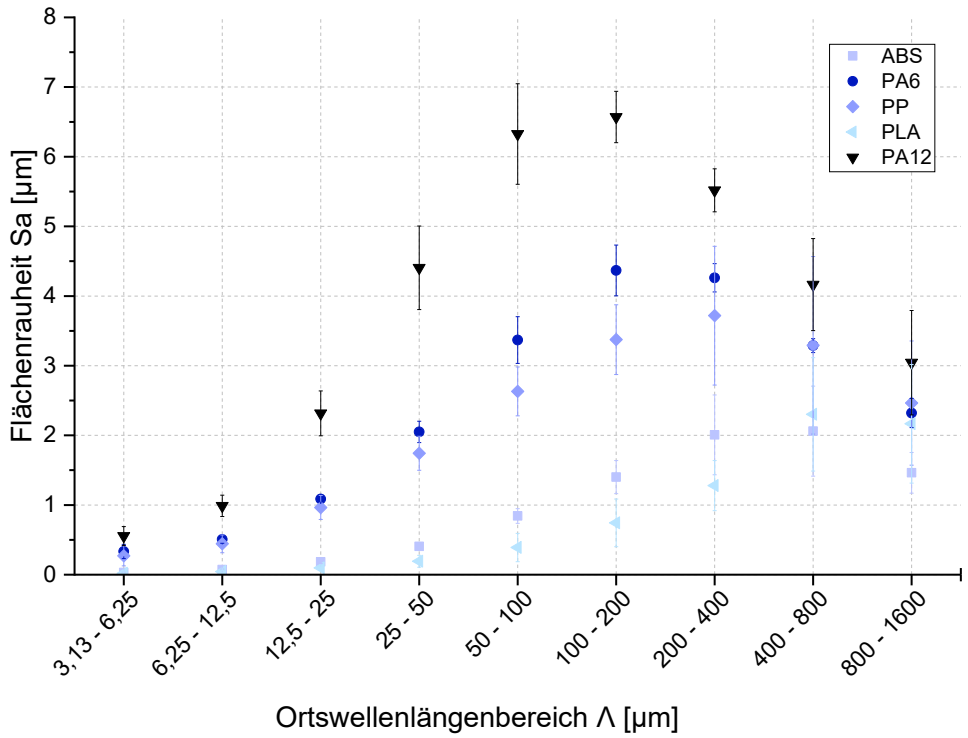



**Bild 46**
Flächenrauheit Sa der verwendeten Kunststoffproben im Ausgangszustand für verschiedene Ortswellenlängen

Messeinstellung Sa:
FOV: 5mmx5mm
Resolution:
3204px x 3200 px

### 6.3.2 Bestimmung des Schmelztemperaturbereichs verschiedener Kunststoffe

Der Schmelztemperaturbereich ist in der Literatur und sogar bei den Herstellern der Materialien verschieden dargestellt. Anders als bei Metallen, die für gewöhnlich eine eindeutige Schmelztemperatur aufweisen, haben Kunststoffe einen Schmelzbereich, dessen Minimal- und Maximalwert angegeben wird. Erschwerend hierzu kommt, dass für das gleiche Material unterschiedliche Werte angegeben werden. So wird beispielsweise bei Polypropylen (PP) durch die Netzsch-Gerätebau GmbH ein Schmelzbereich von 160 – 165 °C angegeben [31] und durch den Hersteller der verwendeten additiv gefertigten Probe eine einzelne Schmelztemperatur von 120 °C [46]. Der Unterschied beträgt 40 °C und erschwert dadurch die Prozessplanung. Da die Schmelztemperatur eine notwendige Information darstellt, um ein gutes Ergebnis beim Laserpolieren zu erzielen, wird der Schmelzbereich für alle Materialien experimentell bestimmt. Die Messungen werden mit dem Schmelzpunktmessgerät MPM-H3 der Schorpp Gerätetechnik [47] durchgeführt. Hierfür wird der Kunststoff pulverisiert und in Kapillarröhrchen in das Messgerät eingeführt. Das Gerät temperiert die Proben gezielt mit aufsteigender Temperatur. Durch ein eingebautes Mikroskop können die Proben beobachtet und visuell ausgewertet werden. Wie die Bestimmung des Schmelzbereichs durchgeführt wurde, ist exemplarisch an PP gezeigt und in Bild 47 dargestellt. Gestartet wird das Messgerät kurz unterhalb der laut Datenblatt

erwarteten Schmelztemperatur, in diesem Fall laut Hersteller bei 120 °C. Die einzelnen Flocken des Kunststoffs sowie die weiße Farbe sind gut zu erkennen. Bei Erhöhung der Temperatur auf 128 °C beginnt der Kunststoff transparenter zu werden, die einzelnen Flocken beginnen miteinander zu verschmelzen. Bei 135 °C beginnt der Kunststoff zu einer Masse zu verschmelzen und scheint eine minimale Fläche auszubauen. Bei 146 °C ist der Kunststoff komplett klar. Die gelbliche Verfärbung zeigt allerdings, dass bereits chemische Veränderungen durch die Temperatur stattfinden.

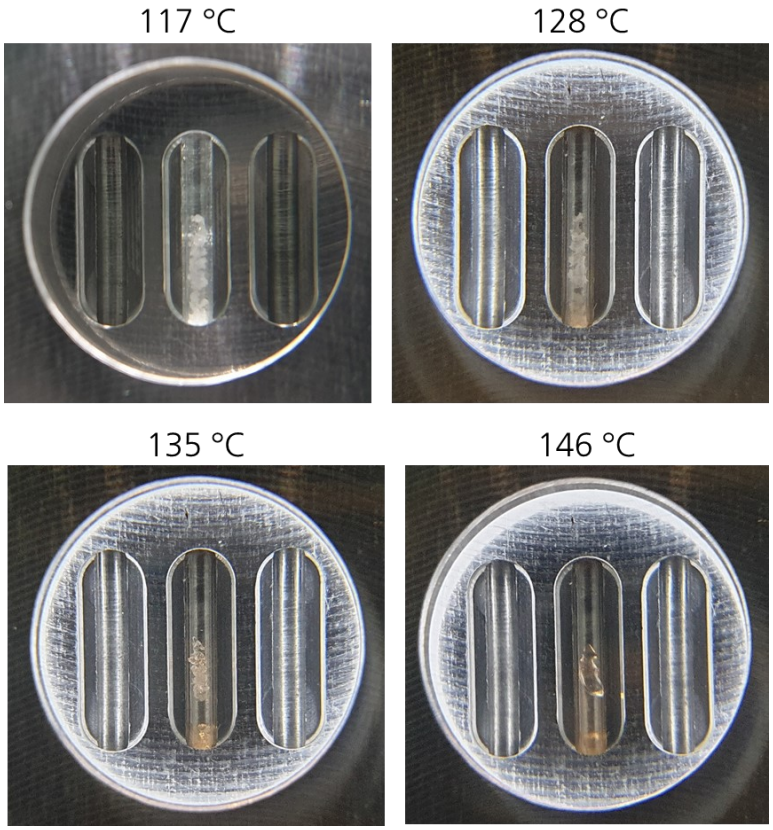



**Bild 47**
Untersuchung des Glasübergangsbereichs bei Polypropylen mit dem Schmelztemperaturbestimmungsgerät MPM-H3

Die Schmelzbereiche für die verwendeten Kunststoffe wurden experimentell, wie beschrieben, festgelegt. Zu beachten ist, dass das Verfahren rein visuell ist und das Ergebnis subjektiv durch den Betrachter festgelegt wird. In Tabelle 14 sind die Ergebnisse der verschiedenen Kunststoffe dargestellt sowie der Unterschied zwischen Herstellerangaben und gemessenen Werten. [45, 48–51]

**Tabelle 14** Schmelztemperaturen der verschiedenen Kunststoffmaterialien laut Hersteller und mittels Schmelzpunktmessbestimmungsgerät bestimmt. [45, 48–51]

| Material | Herstellerinfo Temperaturbereich [°C] | Gemessener Temperaturbereich [°C] |
|---|---|---|
| ABS | --- | --- |
| PA12 | 176 | 185 – 199 |
| PA6 | 215 | 202 – 215 |
| PLA | 150 – 160 | 146 – 168 |
| PP | 120 | 123 – 145 |

Der untere Wert des gemessenen Temperaturbereichs wurde so definiert, dass die einzelnen Polymerflocken begannen miteinander zu verschmelzen (siehe Bild 47, 128 °C). Der obere Wert wurde als vollständige Schmelzung des Materials definiert (siehe Bild 47, 146 °C)

Das Ergebnis zeigt, dass die Literaturwerte und die gemessenen Werte der Schmelztemperaturen teilweise übereinstimmen, aber eine große Schwankungsbreite haben. Für PA12 ist der gemessene Schmelzbereich knapp 9 °C höher als laut Literatur, während die Werte für PA6 und PLA mit der Literatur übereinstimmen.

Für ABS wurde vom Hersteller keine Schmelztemperatur angegeben und auch in der Literatur ist kein eindeutiger Wert zu finden. Dies hat sich auch in den Experimenten widergespiegelt, da ABS sich anders verhielt als die anderen Kunststoffe. Die einzelnen Flocken des Kunststoffs waren auch bei ABS sichtbar, allerdings hat sich auch nach über 140 °C keine Änderung des Zustands ergeben. ABS weist laut Hersteller eine Wärmeformbeständigkeit bis 90 °C auf. Bei den anderen Kunststoffen wurde bereits bei einer Erhöhung dieser Temperatur um 60 % entweder ein Schmelzvorgang beobachtet oder eine vollständige Schmelzung erreicht. Der Versuch wurde daher abgebrochen und die Literatur mit der fehlenden Angabe des Schmelzbereichs bestätigt. ABS besteht aus drei Komponenten, die unterschiedlich oft im Polymer vorkommen. Je nach Kettenlänge der einzelnen Komponenten kann der Schmelzbereich von ABS höher oder niedriger liegen. Denkbar ist, dass das Aufwärmen von ABS nur zu einer sequenziellen Schmelze führt, die nicht direkt ersichtlich ist, da nur die Butadien Kette aufschmilzt, während der Rest stabil bleibt.

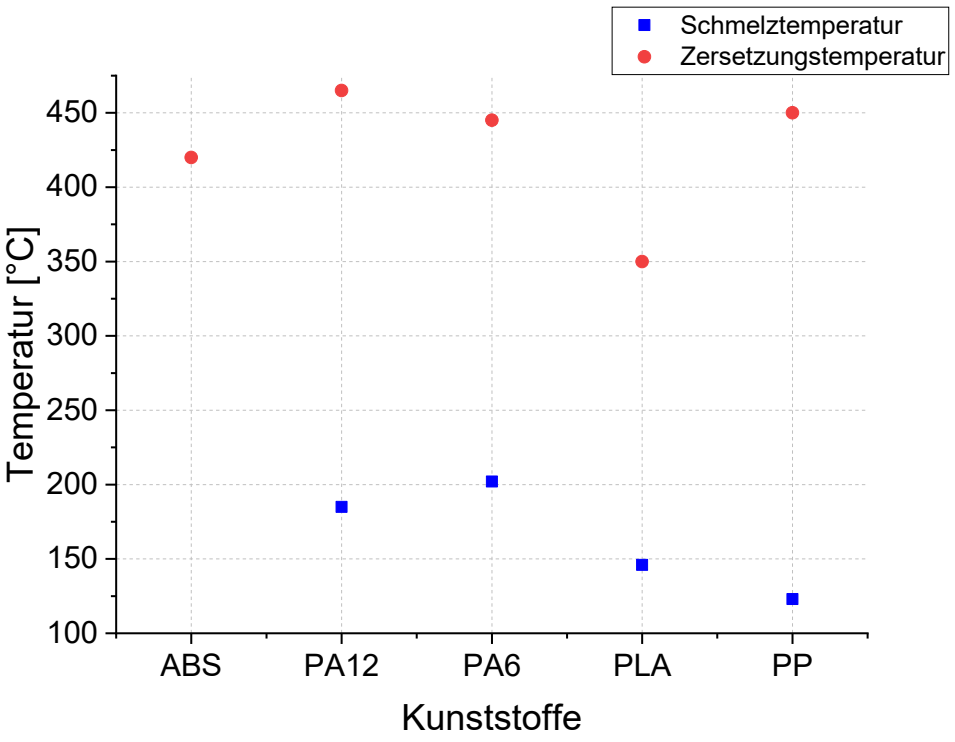



**Bild 48** Darstellung der Schmelz- und Zersetzungs-temperaturgrenzen für die verschiedenen Kunststoffe. Die Werte geben den Anfang der jeweiligen Bereiche an.

In Bild 48 sind die Schmelz- und Zersetzungstemperaturen der Kunststoffe gegenübergestellt. Hierbei wurde stets der Wert ausgewählt, bei dem der jeweilige Temperaturbereich beginnt. Für ABS wird keine Schmelztemperatur dargestellt, da weder eine gemessen werden konnte noch in der Literatur ein Schmelzbereich definiert ist. Zu erkennen ist, dass die Polyamide leicht höhere Schmelztemperaturen aufweisen als PLA und PP. Die größte Temperaturspanne weist PP auf.

### 6.3.3 Bestimmung der Viskosität

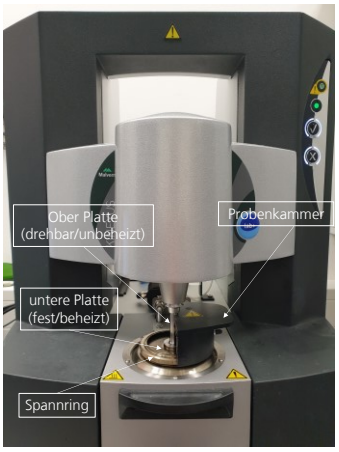
Die Viskosität ist ein komplexer Parameter, da sie nicht nur von einem Faktor abhängt, sondern von vielen strukturellen und physikalischen Eigenschaften. So ist sie stark temperaturabhängig, aber auch von äußeren Scherkräften oder Drücken beeinflusst. Die wichtigsten Eigenschaften der Kunststoffe, die die Viskosität beeinflussen sind [7, 30, 35]:

- Dies Struktur (Verzweigungsmöglichkeiten, Kettenlänge)
- Die molekulare Masse
- Die Molmassenverteilung
- Das Potential zur Feuchtigkeitsaufnahme

- Die thermophysikalischen Werkstoffeigenschaften

Die rheometrischen Eigenschaften von Kunststoffen sind oft nicht bekannt und auch nach größerer Recherche nur schwer bis gar nicht auffindbar, da die jeweiligen Eigenschaften immer nur für diesen speziell hergestellten Kunststoff gelten. Zusätzlich verändert sich das rheologische Verhalten der Kunststoffe je nach vorheriger Verarbeitung, da Kunststoffe ein sogenanntes thermisches Gedächtnis haben. [7] Im Folgenden wird die komplexe Viskosität $\eta^*$ in Abhängigkeit der Temperatur experimentell mit einem Rheometer bestimmt, um möglichst realistische Werte für die Untersuchungen zu gewinnen. Der Aufbau eines solchen Rheometers ist in Bild 49 dargestellt.

**Bild 49**
Rheometeraufbau zur Vermessung der Viskosität




Die komplexen Viskositäten $\eta^*$ der fünf Polymere wurden abhängig von der Temperatur in einer Doppelbestimmung mit einem Rotationsrheometer bestimmt. Die komplexe Viskosität gilt für eine oszillatorische Scherung, die laut der Cox-Merz-Beziehung (siehe Formel 6.11) der statischen Scherung entspricht, sodass die komplexe Viskosität als Parameter für das Laserpolieren verwendet werden kann unter der Voraussetzung, dass die Kreisfrequenz gleich der Schergeschwindigkeit ist. [52]

**6.11**

$$|\eta_*(\omega)| = \eta(\omega = \dot{\gamma})$$

Zunächst wurden zwei verschiedene Amplitudensweeps durchgeführt, um den Wertebereich für die bei der späteren Messung verwendeten Deformation der jeweiligen Kunststoffe zu ermitteln. Mit einer sogenannten „Shear Strain Controlled" Messung wurde die nötige Deformation ermittelt und mit einer „Shear Stress Controlled" Messung wurde diese validiert. Die Messungen wurden bei einer Frequenz von 1 Hz durchgeführt und der Klirrfaktor berücksichtigt, welcher als charakteristischer Parameter für die Zerstörschwelle des Materials verwendet werden kann. Der Klirrfaktor gibt im Allgemeinen die

nichtlineare Verzerrung des schwingenden Systems an und wie harmonisch oder disharmonisch die Schwingung ist. [53] Wenn die Werte der Deformation so gewählt wurden, dass die Stoffeigenschaften des Polymers sich über die Zeit nicht verändern, so liegen die Kurven für die Shear Strain Controlled und die Shear Stress Controlled Messungen übereinander, sodass diese Parameter für die Analyse verwendet werden können. Mit der ermittelten Deformation wurde anschließend ein Temperatursweep ermittelt, mit dem die Veränderung der Viskosität über einen definierten Temperaturbereich bestimmt werden kann. Hierzu wurde die Deformation mit dem niedrigsten Klirrfaktor verwendet, um das Signal-Rausch-Verhältnis zu minimieren und einer Zerstörung der Polymerstruktur vorzubeugen.

Für den Temperatursweep wurden eine Deformation von 1 %, eine Frequenz von 1 Hz und eine Temperaturrampe von 5 °C/min verwendet. Die minimale und maximale Temperatur der Temperaturrampe wurde entsprechend des Versuchsplans gewählt, um den gleichen Bereich abzudecken, in dem der Kunststoff später laserpoliert worden ist. Für den Platte-zu-Platte Aufbau wurden Platten mit 20 mm Durchmesser verwendet und zum Aufheizen ein externer Ofen. Die Messung selbst erfolgte abkühlend. Für die Messungen wurde Stickstoff als Schutzgas verwendet, um eine Reaktion des Polymers mit der Umgebungsluft zu verhindern. Mit den Messungen wurde das Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) an der RWTH Aachen beauftragt, um die Messungen fachgerecht durchzuführen.

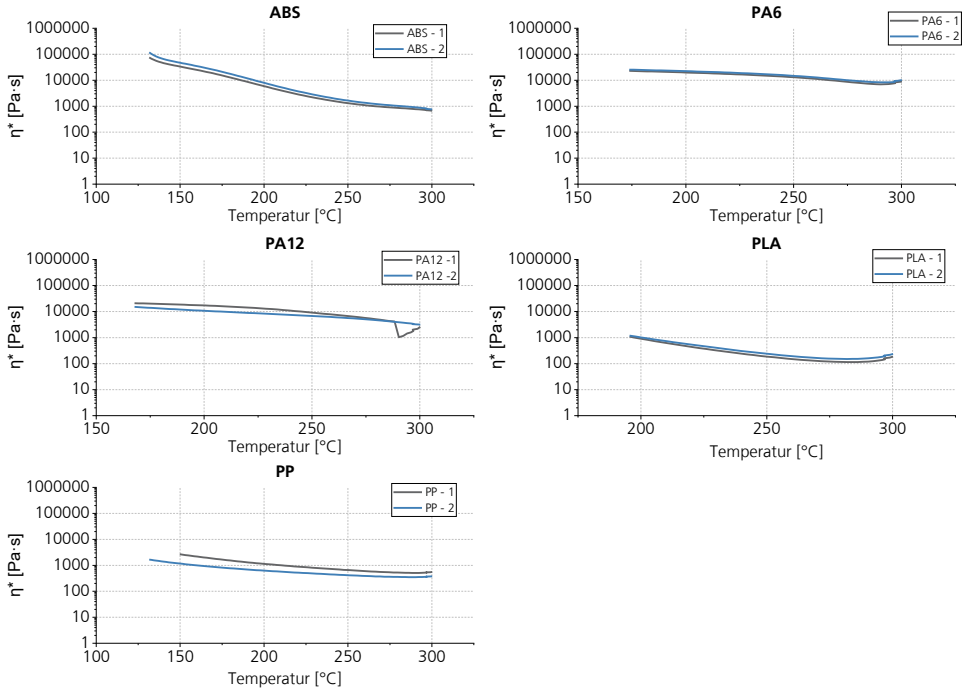



**Bild 50** Komplexe Viskosität η* über die Temperatur für die Kunststoffe ABS, PA6, PA12, PLA und PP als Doppelbestimmung

Die komplexe Viskosität $\eta^*$ ist in Bild 50 in Abhängigkeit der Temperatur logarithmisch dargestellt. Die komplexe Viskosität sinkt für alle Kunststoffe mit steigender Temperatur, was durch die Theorie der Kunststoffschmelze erklärt werden kann (siehe Kapitel 3.1.1). Zum Ende der Messung ist in einigen Fällen ein leichter Anstieg zu beobachten, welcher durch das Einschwingen des Messgeräts erklärbar ist. Bei Polyamid 12 ist bei einer Messung ein Messartefakt aufgetaucht, das in der zweiten Messung nicht zu erkennen ist. Für ABS ist der abnehmende Gradient der komplexen Viskosität deutlich höher als für die anderen Kunststoffe.

Die Viskositätskurven zeigen, dass selbst Messungen des gleichen Probenmaterials Schwankungen in der Viskosität aufweisen, sodass von einer Mittelung der zwei Werte abgesehen wurde. Die Messungen wurden an verschiedenen Stellen der additiv gefertigten Quader durchgeführt.

Während sich die komplexe Viskosität für die restlichen Kunststoffe über den gesamten Temperaturverlauf eindeutig unterscheidet, ist diese bei ABS stark temperaturabhängig und schneidet die Viskositätskurven der anderen Kunststoffe.

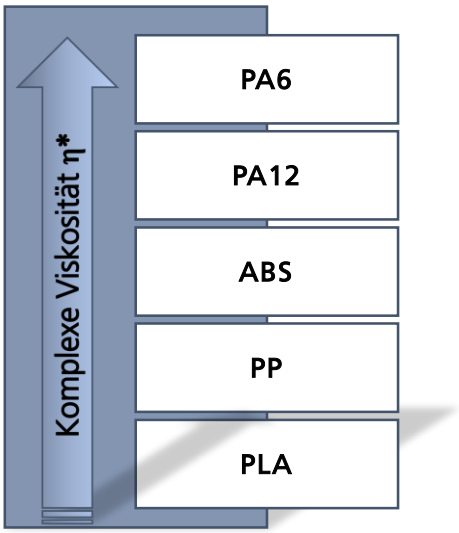



**Bild 51** Einordnung der komplexen Viskosität $\eta^*$ für die verschiedenen Kunststoffe

Für die jeweils zweit höchste Temperaturstufe beim Versuchsplan zum Laserpolieren (Tabelle 15) ergibt sich die in Bild 51 dargestellte Reihenfolge für die komplexe Viskosität. PLA weist hierbei die niedrigste Viskosität bei der entsprechenden Temperatur auf und PA6 die höchste. ABS ist bei der ausgewählten Temperatur im Mittelfeld einzuordnen.

### 6.3.4 Einfluss der Viskosität auf die Rauheitsreduktion beim Laserpolieren

In einer dritten experimentellen Versuchsreihe werden verschiedene Kunststoffe unter gleichen Bedingungen laserpoliert. Das Hauptziel der Versuchsreihe ist die Untersuchung der in Kapitel 5 aufgestellten Hypothese. Weitergehend sollen die Versuche zeigen, dass auch für andere Kunststoffe eine Laserpolitur gute Ergebnisse erzielt wird, ohne die Prozessparameter zu optimieren, indem mit einer ortsaufgelösten Temperaturregelung die Schmelz- und Verbrennungstemperaturen des Kunststoffes eingehalten werden.

#### 6.3.4.1 **Untersuchungsziel**

Für die folgende Versuchsreihe wird eine Versuchshypothese aufgestellt, deren Auflösung das Ziel der Untersuchung ist. Da eine niedrige Viskosität bedeutet, dass die Kunststoffschmelze gute Fließeigenschaften besitzt und diese für eine Glättung der Oberfläche notwendig sind, sollten die Kunststoffe mit niedriger Viskosität mit größerem Erfolg laserpoliert werden können als jene mit hoher. Die Viskosität wirkt im Laserpolierprozess als dämpfende Kraft, die der Oberflächenspannung entgegenwirkt. Wenn die Viskosität abnimmt, kann die Oberflächenspannung besser wirken, was zu einem erhöhten Glattziehen der Schmelzbadoberfläche führt. Dies funktioniert allerdings nur so lange, wie die Oberflächenspannung durch die steigende Temperatur nicht zu klein wird.

Daraus folgend soll die Versuchshypothese untersucht werden, ob mit abnehmender Viskosität eine höhere Rauheitsreduktion erzielt werden kann. Dementsprechend sollte auf PLA die größte Rauheitsreduktion erzielt werden können und auf PA6 die niedrigste.

#### 6.3.4.2 **Festlegung des Versuchsplans**

Zur Durchführung der Versuchsreihe wird ein Standardversuchsplan verwendet, der die verschiedenen Kunststoffarten und die Temperatur als Parameter behandelt und die Oberflächenrauheit als Zielgröße. Der Versuchsplan ist in Tabelle 15 dargestellt. Die Temperaturstufen werden in Prozent angegeben, da die Kunststoffe unterschiedliche Schmelzbereiche aufweisen und die Bearbeitung mit gleichen Temperaturen nicht einheitlich durchgeführt werden kann. Die Temperatur der Stufen ergibt sich nach Formel 6.12.

**6.12**

$$T_{SOLL} = T_{Schmelz} + Stufe_{\%} \cdot (T_{Zersetzung} - T_{Schmelz})$$

Der Wert $T_{Schmelz}$ wird entsprechend der Messungen in Kapitel 6.3.2 gewählt, wogegen $T_{Zersetzung}$ der Literatur entnommen wird. Im Fall von ABS wird die Temperatur gewählt, bis zu der der Kunststoff laut Literatur seine Formstabilität

behält, da keine Schmelztemperatur in der Literatur genannt wird bzw. mit dem hier verwendeten Verfahren keine gemessen werden konnte.

**Tabelle 15**
Versuchsplan zur Bestimmung des Einflusses der Viskosität auf die Rauheitsreduktion beim Laserpolieren mit der Zieltemperatur als variabler Parameter

| Material | PA12 | PA6 | PP | ABS | PLA |
|---|---|---|---|---|---|
| Stufen | | | | | |
| 10 % | 220 °C | 232 °C | 167 °C | 128 °C | 178 °C |
| 20 % | 248 °C | 257 °C | 199 °C | 161 °C | 198 °C |
| 30 % | 275 °C | 281 °C | 232 °C | 195 °C | 219 °C |
| 40 % | 303 °C | 306 °C | 264 °C | 228 °C | 239 °C |
| 50 % | 331 °C | 330 °C | 297 °C | 261 °C | 260 °C |
| 60 % | 359 °C | 355 °C | 330 °C | 294 °C | 280 °C |

Die restlichen Parameter werden anhand der Ergebnisse aus Kapitel 6.2.3 festgelegt und jeweils so gewählt, wie die Signifikanzanalyse vorsieht. Die Bearbeitungsparameter sind in Tabelle 16 aufgezeigt.

**Tabelle 16**
Prozessparameter für die exeperimentelle Versuchsreihe zur Bestimmung des Einflusses der Viskosität auf die Rauheitsreduktion

| Prozessparameter | Wert |
|---|---|
| $d_L$ | 400 µm |
| $v_{scan}$ | 50 mm/s |
| dy | 60 % |
| F | Getrocknet |
| n | 1 |

Die Größe der bearbeiteten Felder beträgt 10 x 10 mm² und der Versuchsplan wird zur statistischen Ergebnisverwertung dreimal wiederholt.

### 6.3.4.3 **Durchführung des Versuchsplans**

Für die Durchführung des Versuchsplan konnte nicht das gleiche Lasersetup, wie in Kapitel 4.2.2, verwendet werden, da das gesamte Setup zwischenzeitlich ausgetauscht wurde. Verwendet wurde ein System mit vergleichbarer Achse und einem $CO_2$-Laser, mit dem die gleichen Einstellungen wie im vorherigen Versuchsaufbau inklusive entsprechender Temperaturregelung umgesetzt werden können (siehe Bild 52).

**Bild 52**
Versuchsaufbau für die experimentellen Untersuchungen zur Bestimmung des Einflusses der Viskosität auf die Rauheitsreduktion

Der Versuchsplan konnte für alle Proben wie festgelegt durchgeführt werden.

### 6.3.4.4 **Ergebnisse**

Die laserpolierten Kunststoffproben wurden nach der Bearbeitung erneut mit dem Weißlichtinterferometer vermessen und die Oberflächenrauheit Sa berechnet.

In Bild 53 ist die Rauheitsreduktion für alle Proben durch das Laserpolieren über die Ortswellenlängen $\Lambda$ der Rauheit dargestellt. Die Rauheitsreduktion wurde für die jeweiligen Kunststoffe aus der Flächenrauheit der Ausgangszustände und der Flächenrauheit der laserpolierten Proben berechnet. Wenn die Rauheitsreduktion negativ ist, wurde die Flächenrauheit entweder nicht reduziert oder sogar erhöht. Dieses Ergebnis kann insbesondere bei besonders kleinen Rauheitsreduktionen auftreten, da die Ausgangsrauheit durch einen Mittelwert wiedergegeben wird und die Flächenrauheit auch im Ausgangszustand an verschiedenen Positionen höher sein kann. Aufgetragen wurde für jeden Kunststoff die maximal erzeugte Rauheit, unabhängig von der Temperaturstufe

Für ABS konnte keine Rauheitsreduktion erreicht werden. Die Rauheitsreduktion war durchgehend negativ, was bedeutet, dass die Flächenrauheit im Gegensatz sogar erhöht wurde. Aus diesem Grund ist ABS in den Ergebnisdiagrammen nicht vertreten.

Die Rauheitsreduktion für PLA ist deutlich geringer als die der anderen Kunststoffe. Die Kunststoffe PP, PA12 und PA6 dagegen weisen im Schnitt eine gleichwerte Rauheitsreduktion über alle Wellenlängenbereiche auf. Tendenziell wird bei PA6 eine geringfügig niedrigere Rauheitsreduktion erreicht als für PP und PA12. Die Rauheitsreduktion sinkt im Schnitt für alle Kunststoffe ab einer Ortswellenlänge von ca. 400 µm. Dieses Verhalten kann damit begründet sein, dass der Laserstrahldurchmesser von 400 µm sich der Prozessgrenze nähert. Dieses Verhalten wurde bereits für Polyamid 12 im vorherigen Kapitel 6.2.3.4 angedeutet.

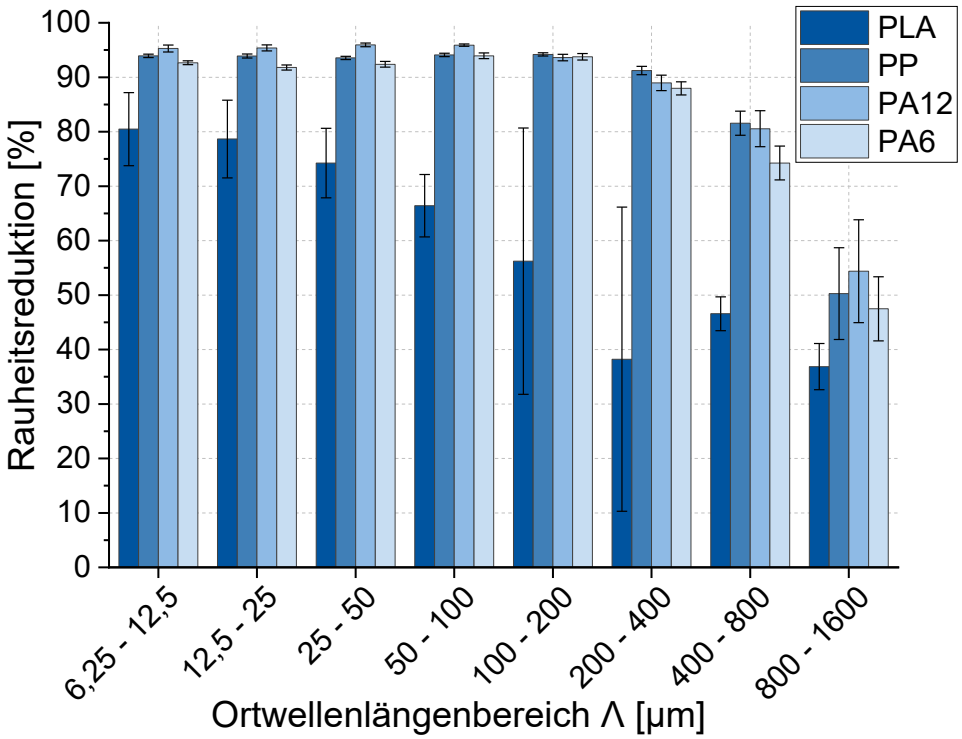



**Bild 53**
Rauheitsreduktion über die Ortswellenlängen-bereiche der Flächenrauheit Sa für die Kunststoffe PLA, PP, PA12 und PA6

Die Daten sind nicht normalverteilt und können durch Transformation nicht in eine normalverteilte Stichprobenmenge gebracht werden. Aus diesem Grund werden die Daten nur anhand von Diagrammen und Mittelwertbeobachtungen ausgewertet und keine ANOVA durchgeführt. Bei Betrachtung der verschiedenen Temperaturstufen ist zu erkennen, dass für die niedrigen Ortswellenlängen die maximale Rauheitsreduktion bei niedrigeren Temperaturen erreicht wurde. Für die hohen Ortswellenlängen gilt dies nicht. Im vorangegangenen Kapitel wurde bereits gezeigt, dass für die Reduktion von Mikrorauheit bereits niedrige Temperaturen ausreichen können und die Temperaturstufe keinen sichtbaren Effekt mehr hat. Für die Polyamide wurde die

maximale Reduktion ab 40 % Temperaturerhöhung erreicht. Für PP wurden von 6,25 – 100 µm Ortswellenlänge die höchsten Rauheitsreduktionen ab 30 % Temperaturerhöhung erreicht und ab 200 µm Ortswellenlängen erst bei 60 % Erhöhung. PLA dagegen wurde bei zu hohen Temperaturen bereits zersetzt, sodass nur bei 30 % und 40 % Erhöhung eine Reduktion erreicht wurde. Unterhalb dieser Temperatur fand keine Oberflächenpolitur statt und darüber wurde das Material zersetzt.

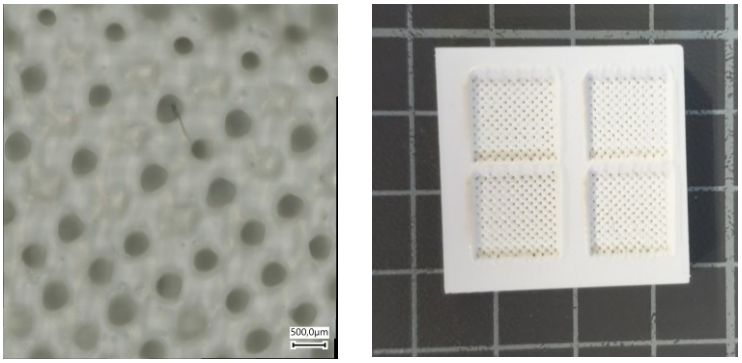



**Bild 54** Aufnahme einer FDM gefertigten Probe aus PLA nach dem Laserpolieren.

Links: Mikroskop-aufnahme
Rechts:Fotografie

In Bild 54 ist eine laserpolierte Probe aus PLA bei der höchsten Temperaturstufe zu sehen. Links ist eine Mikroskopaufnahme dargestellt, die die freigelegten Poren von rund 400 µm Durchmesser zeigt. Auf dem Foto auf der rechten Seite sind auch die Ränder der bearbeiteten Felder zu sehen, die einen deutlichen Anstieg zum Rand zeigen. Für hohe Temperaturen der SLS gedruckten Proben existiert dieser Effekt nicht, sondern hier ist stattdessen eine Aufwölbung des Materials am Rand zu sehen. Gerade im Wellenlängenbereich von 200 – 400 µm ist bei PLA eine Abnahme der Rauheitsreduktion von > 15 % zu erkennen, während die für die SLS gedruckten Proben nur ein Drittel davon beträgt.

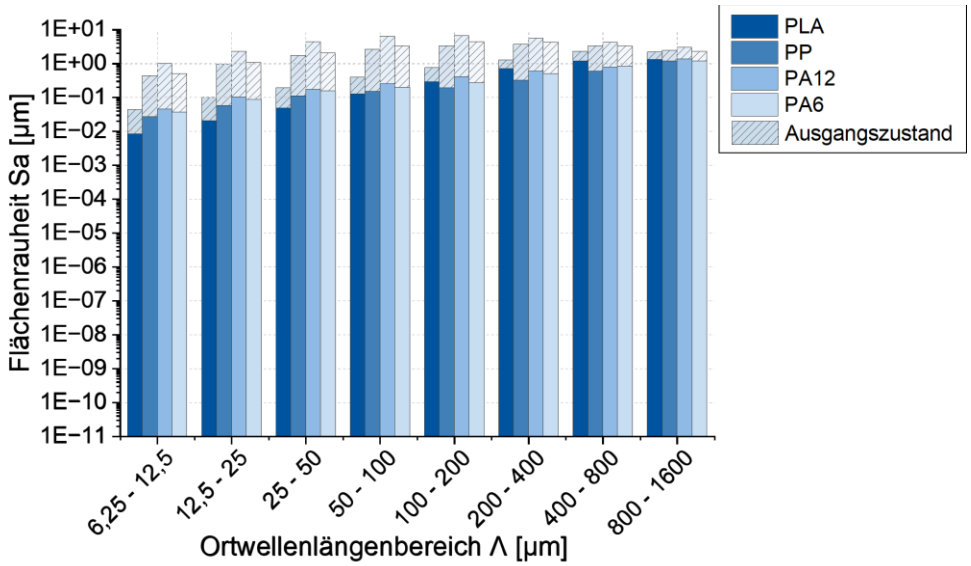



**Bild 55**
Flächenrauheit Sa über verschiedene Ortswellenlängenbereiche für die Kunststoffe PLA, PP, PA12, PA6

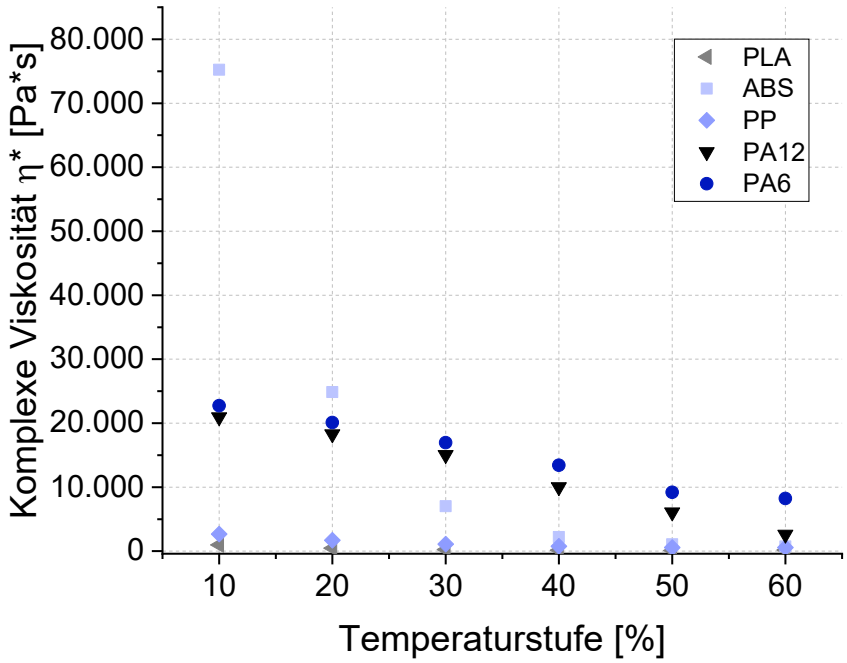
Straffiert ist der Ausgangszustand im Hintergrund dargestellt

In Bild 55 sind die verschiedenen Kunststoffe nochmals anhand der Flächenrauheit Sa dargestellt über die Ortswellenlängenbereiche. Gezeigt werden zum einen die erzeugte Flächenrauheit für die verschiedenen Kunststoffe sowie straffiert der Ausgangszustand des jeweiligen Kunststoffs im Hintergrund. Hier wird deutlich, dass obwohl die Rauheitsreduktion für PLA am niedrigsten ausfällt, die Flächenrauheit nicht höher ist als für die anderen Kunststoffe. Im Gegenteil ist diese sogar im Bereich der Mikrorauheit niedriger. Dies liegt daran, dass die Ausgangsrauheit von PLA als FDM-gedruckte Probe bereits niedriger ist als bei den SLS-gedruckten Proben. Das Potenzial zur Reduktion von Rauheit ist daher wesentlich niedriger als bei Proben mit höherer Ausgangsrauheit.

Die Ergebnisse zeigen, dass nicht allein aufgrund des Werkstoffs und dessen Viskositätswert die niedrigste Flächenrauheit erreicht wird, sondern dies stark von der Ausgangsrauheit abhängig ist. Aus diesem Grund wird im Folgenden die Viskosität in Abhängigkeit der Temperatur betrachtet.

In Bild 56 ist die komplexe Viskosität für alle Kunststoffe über die verschiedenen Temperaturstufen aufgetragen, die für die Experimente verwendet wurden. Hieraus wird ersichtlich, dass die Viskositäten für die Polyamide für die einzelnen Temperaturstufen, unabhängig der absoluten Temperatur, ähnlich sind. Im hohen Temperaturbereich beginnt die komplexe Viskosität allerdings zu divergieren. Das gleiche gilt für die Kunststoffe PP und PLA. Einzig die Viskosität von ABS unterscheidet sich stark durch den nahezu exponentiellen Abfall der Viskosität über die Temperatur. Da die Viskositäten sich für PA6 und PA12 sowie für PP und PLA stark ähneln, werden diese im Folgenden paarweise verglichen sowie alle Proben zusammen.

**Bild 56** Darstellung der komplexen Viskosität über die verwendeten Temperaturstufen für die verwendeten Kunststoffe




Zur detaillierten Betrachtung der Rauheitsreduktion in Abhängigkeit der Viskosität wurde für alle Materialien und für jede verwendete Temperatureinstellung die entsprechende Viskosität aufgetragen. Für Viskositäten unterhalb von 4000 Pa*s kann in dieser Darstellung keine Zuordnung der Rauheitsreduktion stattfinden, da hier von 0 – 95 % alle Werte vertreten sind. Für Viskositäten oberhalb dieser Grenze lässt sich aber eine eindeutige Tendenz erkennen, die zeigt, dass die Rauheitsreduktion mit steigender Viskosität sinkt.

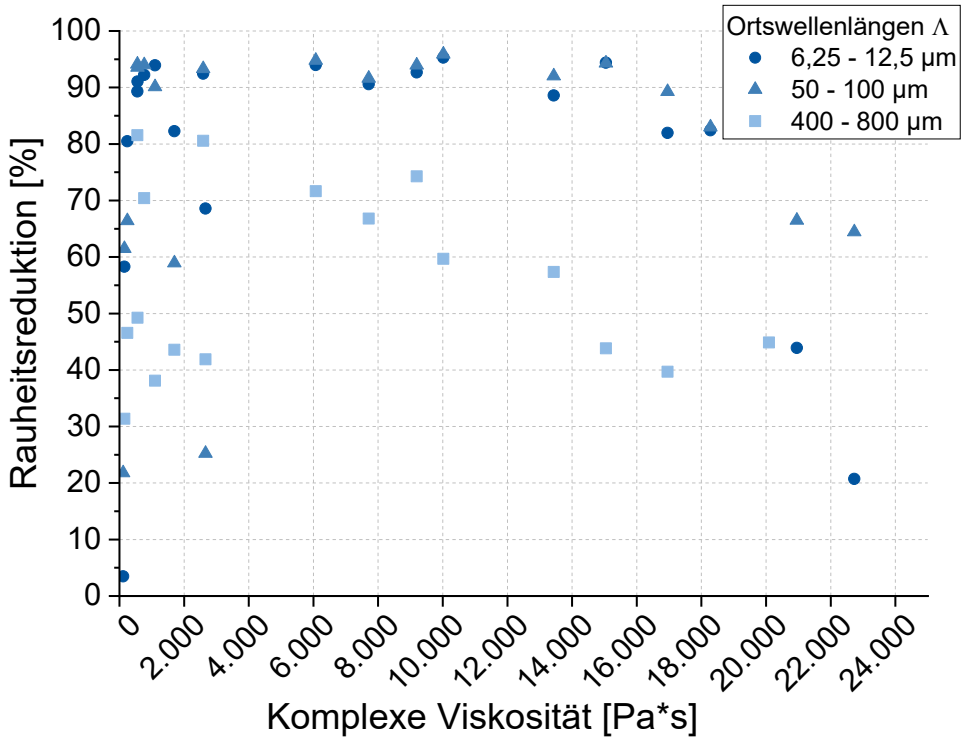



**Bild 57**
Rauheitsreduktion über die komplexe Viskosität für verschiedene Ortswellenlängen der Rauheit für die Kunststoffe PA12, PA6, PLA und PP

Die Darstellung wurde, wie oben beschrieben, aufgrund ihrer Viskosität auf die zwei Paare PA12 und PA6 sowie PLA und PP aufgeteilt. In Bild 58 ist die Rauheitsreduktion über die komplexe Viskosität für PA12 und PA6 dargestellt. Die Viskosität im verwendeten Temperaturbereich ist mit einer Spanne von etwa 22.000 Pa*s weitreichender als für die Proben aus PP und PLA und eine Abnahme der Rauheitsreduktion über die Zeit ist zu erkennen.

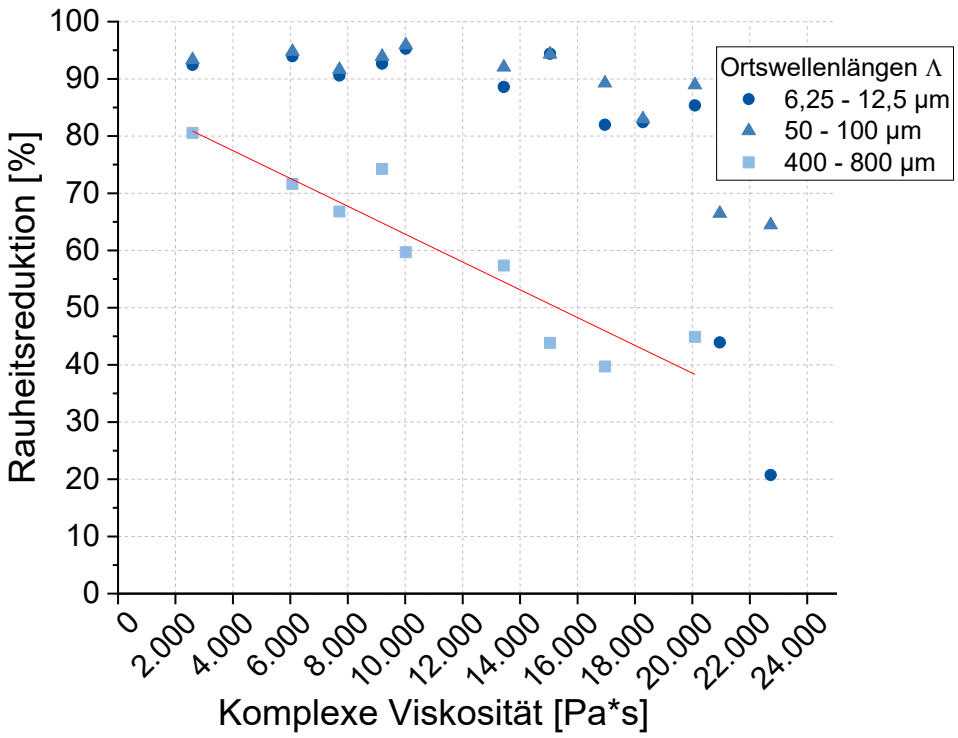



**Bild 58**
Rauheitsreduktion über die Viskosität für verschiedene Ortswellenlängen der Rauheit. Berücksichtigt werden die SLS-gedruckten Kunststoffe PA6 und PA12

Obwohl keine Normalverteilung vorliegt, wurde für die Datenreihe eine lineare Regressionsreihe durchgeführt, um eine Tendenz für die Relevanz des Zusammenhangs zu bekommen. Mit einer linearen Regression der Kurven lassen sich Bestimmtheitsmaße von 0,5 für 6,25 – 12 µm Ortswellenlänge bis zu 0,86 für 400 – 800 µm Ortswellenlänge berechnen. Eine Regressionskurve ist exemplarisch für 400 – 800 µm in Bild 58 eingezeichnet. Das Bestimmtheitsmaß gibt an, wie gut die abhängige Variabel, in diesem Fall die Rauheitsreduktion, mit den unabhängigen Variablen, in diesem Fall die Viskosität, vorhergesagt werden kann. Ein exakter Grenzwert, ab wann die Regression einen signifikanten Zusammenhang liefert, existiert nicht. Aus verschiedenen Recherchen wurden Bestimmtheitsmaße ab 0,7 als relevant erachtet.

Die Ergebnisse für PLA und PP sind in Bild 59 dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass die Rauheitsreduktion bei niedrigen Viskositäten unter 500 Pa*s stark ansteigt bis zu einer Rauheitsreduktion von über 90 %. Bei einer komplexen Viskosität von ca. 500 Pa*s existiert ein Wendepunkt. Dies lässt darauf schließen, dass Kunststoffschmelzen mit sehr niedriger Viskosität unter 500 Pa*s nicht gut poliert werden können, obwohl die Viskosität hier ihren Tiefpunkt hat. Dies kann damit erklärt werden, dass die Oberflächenspannung, die für die Glättung die antreibende Kraft ist, nicht wirken kann, da das Verhältnis aus Viskosität und

Oberflächenspannung nicht mehr ausreichend ist, um die Oberfläche erfolgreich glatt zu ziehen.

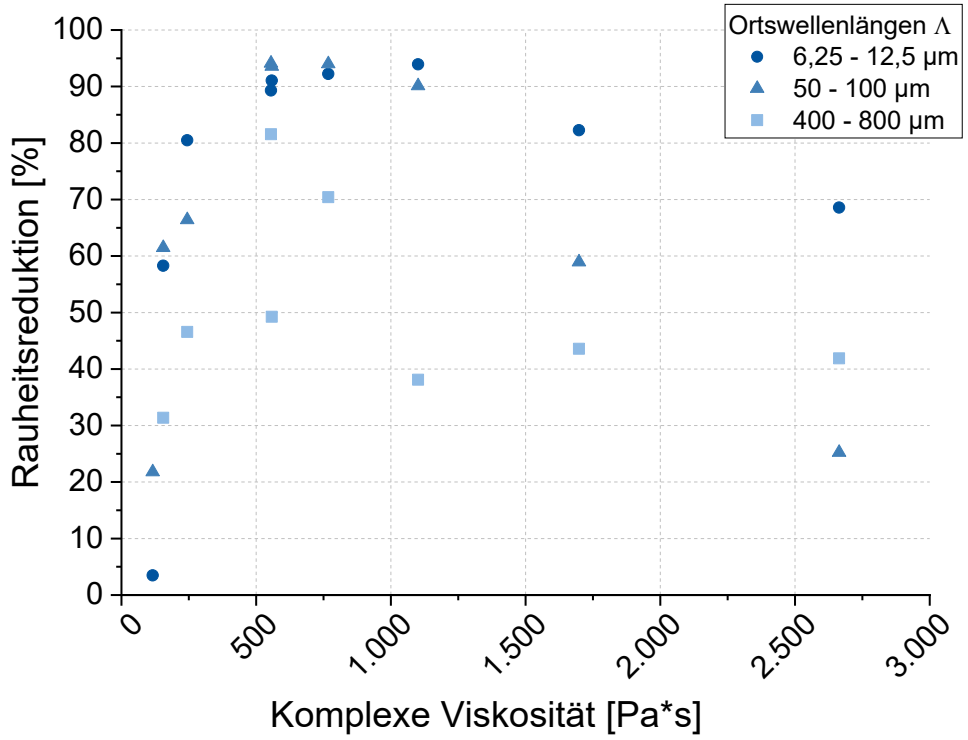
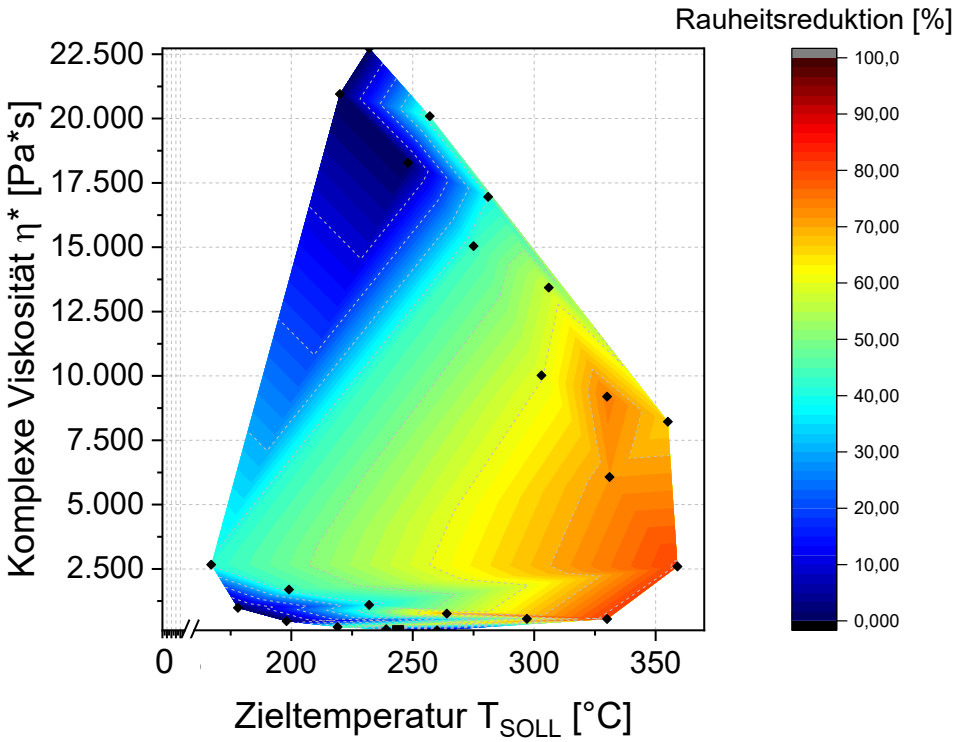



**Bild 59**
Rauheitsreduktion über die Viskosität für verschiedene Ortswellenlängen der Rauheit. Berücksichtigt werden die FDM-gedruckten Kunststoffe PP und PLA

Ab diesem Wendepunkt ist auch hier eine Abnahme der Rauheitsreduktion bei steigender Viskosität zu erkennen. Einzig für die Ortswellenlänge 400 – 800 µm ist keine Abnahme zu sehen. Ausgenommen der zwei Mittelwerte bei 500 – 750 Pa*s bleibt die Rauheitsreduktion über die komplexe Viskosität konstant. Dieses Verhalten ist für die Ortswellenlänge 800 – 1600 µm ebenfalls zu erkennen.

**Bild 60** Komplexe Viskosität η* über die Temperatur $T_{SOLL}$ mit der Rauheitsreduktion als Farbcodierung

Λ = 400 – 800 µm




In Bild 60 ist die komplexe Viskosität über die Temperatur dargestellt für die verschiedenen Kunststoffe außer ABS. Die Werte entsprechen den Versuchen der verschiedenen Kunststoffe und die Ergebnisse wurden über die Temperatur gemittelt. Die Rauheitsreduktion ist als Farbcodierung abgebildet. Im Diagramm wird der Zusammenhang zwischen der komplexen Viskosität und der Temperatur deutlich sowie deren Einfluss auf die Rauheitsreduktion.

Die Effekte sind in Bild 61 nochmals vereinfacht dargestellt. Die Rauheitsreduktion steigt für sinkende Viskositäten bis zu einer Viskosität von ca. 500 Pa*s. Unterhalb dieser Grenze sinkt die Rauheitsreduktion wieder. Für steigende Temperatur nimmt die Rauheitsreduktion zu. Unterhalb der Schmelztemperatur beginnt bereits eine Umschmelzung, die aber nur zu einer sehr geringen Rauheitsreduktion führt. Die beste Rauheitsreduktion wird entsprechend der zuvor analysierten Ergebnisse mit möglichst kleiner Viskosität sowie hoher Temperatur erreicht. Dies gilt so lange, wie die Prozessgrenzen, die oben definiert wurden, eingehalten werden.

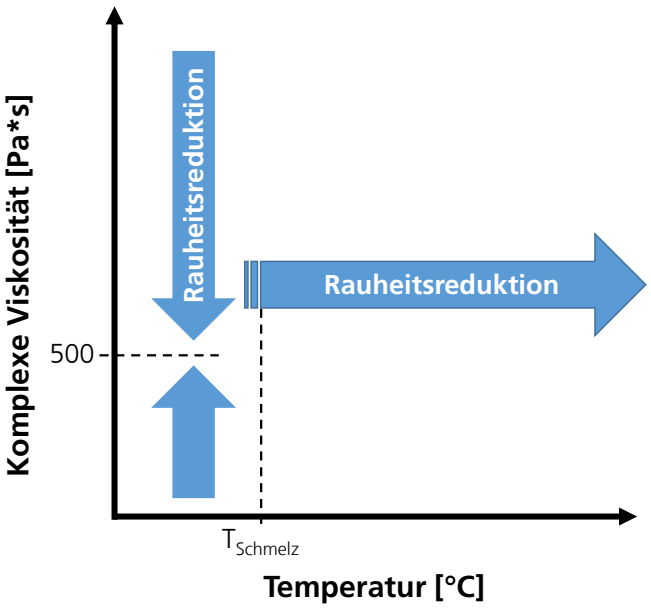



**Bild 61**
Schematische Darstellung der relevanten Randbedingungen beim Laserpolieren additiv gefertigter Kunststoffe

### 6.3.5 Fazit

Mit der durchgeführten Versuchsreihe sollte die Hypothese geklärt werden, ob die Rauheitsreduktion mit sinkender Viskosität zunimmt. Diese These lässt sich zu den Bedingungen der Experimente bestätigen.

Die Streuung in der gemessenen Viskosität ist groß, sodass für eine statistisch zutreffende Aussage mehr als zwei Messungen herangezogen werden müssten. Da die Struktureigenschaften von Kunststoffen sehr variabel sind und sich auch innerhalb einer Kunststoffprobe stark unterscheiden können, wird die Messung immer eine große Streuung aufweisen. Außerdem ist zu bedenken, dass die Viskositätsmessung von hohen zu niedrigen Temperaturen durchgeführt wird und bei den niedrigen Temperaturen bereits strukturelle Veränderungen stattgefunden haben können.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit niedrigen komplexen Viskositäten unter 250 Pa*s nur eine geringe Rauheitsreduktion erzeugt werden kann. Bei steigender Temperatur nimmt aber auch in diesem Bereich die Rauheitsreduktion exponentiell zu, bis zu einem Wendepunkt bei etwa 500 Pa*s. Ab diesem Wendepunkt nimmt die Rauheitsreduktion mit steigender Viskosität nahezu linear ab. Die These, dass mit niedriger Viskosität höhere Rauheitswerte erreicht werden, kann daher im Rahmen dieser Untersuchungen bestätigt werden.

In Kapitel 6.2 wurden die Einflüsse verschiedener Laserparameter auf den Prozess analysiert. Die Prozessparameter beeinflussen hauptsächlich die

Fließeigenschaften der Kunststoffschmelze, also die Viskosität, und die Oberflächenspannung. Sobald das Material einen schmelzflüssigen Zustand erreicht hat, müssen daher die Verhältnisse zwischen Viskosität und Oberflächenspannung stimmen, um das Glattziehen der Oberfläche zu ermöglichen. Dies wird durch das Ergebnis der Rauheitsreduktion in Abhängigkeit der Viskosität deutlich.

Obwohl grundsätzlich für niedrige Viskositäten eine höhere Rauheitsreduktion erreicht wurde, kann die Aussage, dass somit bei PLA die höchste Rauheitsreduktion erreicht werden sollte, nicht bestätigt werden. Die Rauheitsreduktion für PA12, PA6 und PP ist mit durchschnittlich 96,4 % gleich gut. PLA erreicht dagegen eine maximale Rauheitsreduktion von 82,2 %. Für ABS konnte keine Rauheitsreduktion erzielt werden. Die absoluten Flächenrauheitswerte für PLA sind jedoch sogar niedriger als für die anderen Kunststoffe, sodass davon ausgegangen wird, dass die SLS gedruckten Proben ein höheres Potenzial zur Rauheitsreduktion aufweisen aufgrund ihrer höheren Ausgangsrauheit. Die Fertigungsarten unterscheiden sich bereits im Ausgangszustand der additiv gefertigten Kunststoffproben, denn die Oberflächenrauheit der SLS gefertigten Proben sind im Mittel 2,6-mal so groß wie die der FDM gefertigten Proben. Dementsprechend ist auch das Potenzial für die Rauheitsreduktion durch das Laserpolieren bei den großen Rauheiten deutlich höher als bei Proben mit niedriger Oberflächenrauheit. Als größere Herausforderung für die FDM gefertigten Proben hat sich im Laserpolierexperiment die Druckstruktur der Proben erwiesen. Insbesondere bei PLA werden die Gitterstrukturen, die dem Fertigungsverfahren durch die Verwendung des Kunststofffilaments zugrunde liegen, bei den hohen Temperaturen freigelegt. Diese Strukturen führen vor allem im hohen Ortswellenlängenbereich zu großer Rauheit.

Für ABS wurde bereits in der Literatur festgestellt, dass es sich nicht für eine Laserpolitur eignet. Im Gegensatz zu den anderen Kunststoffen besteht ABS nicht nur aus einem Monomer, sondern dreien. Die Zusammensetzung der einzelnen Monomere kann stark variieren und erschwert die Einschätzung des Kunststoffs. M. Layher et. al [17] haben den geringen Materialfluss von ABS als Erklärung verwendet, wieso der Kunststoff sich schlecht polieren lässt.

# 7 Simulation zur Analyse des Temperatur- und Viskositätsgradienten

Um den Temperaturgradienten und dessen Einfluss auf das Polierergebnis genauer zu betrachten, wird eine Simulation des Prozesses durchgeführt. Hierbei wird ein einfaches Modell verwendet, um qualitativ das Temperaturfeld während des Laserpolierens zu analysieren, um Informationen über den Temperatur- und Viskositätsgradienten während des Prozesses zu gewinnen. Das einfache Modell berücksichtigt keine Zersetzungen oder Strömungen im Material. Die Simulation dient daher nicht zur Parameterauslegung, sondern ausschließlich zum Verständnisgewinn. Die Modellrechnungen werden mit verschiedenen Prozessparametern durchgeführt, die im Rahmen der Untersuchungen verwendet wurden. Das Ziel der Simulation ist die Untersuchung, wie der Temperaturgradient sich während des Prozesses verhält und ob im Bearbeitungsfeld Zonen unterschiedlicher Temperatur und somit unterschiedlicher Viskosität entstehen.

In der Literatur wird für unterschiedlichste Modelle zur Temperaturmodellierung von Laserprozessen die allgemeine Wärmeleitungsgleichung (siehe Formel 7.1) als Basis für die Berechnungen verwendet. Die Konvektion wird in diesem Fall nicht berücksichtigt. [37]

**7.1**

$$\rho \cdot c_P \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + Q$$

*$\rho$: Dichte*
*$c_p$: Wärmekapazität bei konstantem Druck*
*$\lambda$: Wärmeleitfähigkeit*
*$\nabla T$: Temperaturgradient*
*$Q$: Äußere Wärmequelle*

Für die Berechnungen wird eine Volumenwärmequelle Q angenommen, da die $CO_2$-Laserstrahlung eine Absorptionstiefe von 300 µm aufweist. Der Absorptionsgrad A und die Eindringtiefe d wurden den Untersuchungen von K. Braun entnommen. [18] In der Analyse der späteren Temperaturen muss berücksichtigt werden, dass diese Werte zwar direkt an additiv gefertigtem PA12 vermessen wurden, allerdings nur im festen Zustand bei Raumtemperatur. Für den flüssigen Zustand werden diese Daten nun als gleich angenommen, wobei diese in der Realität abweichen können. Die Wärmequelle lässt sich nach Formel 7.2 berechnen.

7.2

$$Q = \frac{A \cdot I}{d} \cdot e^{-\frac{z}{d}}$$

*A: Absorptionsgrad*
*I = Intensität*
*d: Eindringtiefe*

Für die Intensität I wird ein Gauß-Strahl angenommen, welcher sich entsprechend Formel 7.3 berechnen lässt. Da die Strahlung bei der Bewegung im Raum nicht konstant bleibt, ist die Strahlintensität von dieser abhängig. [54]

7.3

$$I = I_0 \cdot \left(\frac{w_0}{w(z)}\right)^2 \cdot e^{\frac{-2 \cdot r^2}{w(z)^2}}$$

*$I_0$: Maximale Strahlintensität*
*r: Radialer Abstand vom bewegten Strahlzentrum*
*w(z): Radius des Laserstrahls, an dem die Strahlungsintensität $1/e^2$ von I0 beträgt*
*z: Entfernung von der Achse*

Das Modell wurde für verschiedene Parametersätze mit einer Finite-Elemente-Methode gelöst. Hierzu wurde die Python-Bibliothek DolfinX verwendet [55]. Die zugehörigen Parameter, sind in Tabelle 17 aufgezeigt. Der Laserstrahldurchmesser wurde in Parametersatz 2 verdoppelt, sodass aufgrund des nicht geregelten Laserprozesses die Scangeschwindigkeit und Laserleistung angepasst wurden, um die Intensität von Parametersatz 1 anzupassen. Die restlichen Modellparameter und Modellergebnisse sind im Anhang 12.2 dargestellt. Als Bearbeitungsstrategie wurde die gleiche verwendet wie bei den bisherigen Versuchen (siehe Bild 19).

**Tabelle 17**
Prozessparameter für die Modellierung

| Prozessparameter | Parametersatz 1 | Parametersatz 2 |
|---|---|---|
| Laserstrahldurchmesser | 400 µm | 800 µm |
| Scangeschwindigkeit | 50 mm/s | 200 mm/s |
| Spurversatz | 200 µm | 200 µm |
| Material | PA12 | PA12 |
| Laserleistung | 3 W | 12 W |

Die Modellierung zeigt das Aufheizen und Abkühlen der Probe während des Prozesses. Die temperaturabhängigen Viskositäten können aus den berechneten Temperaturen ermittelt werden, indem die Messdaten aus Kapitel 6.3.3 herangezogen werden. Die Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur für PA12 ist in Bild 62 dargestellt.

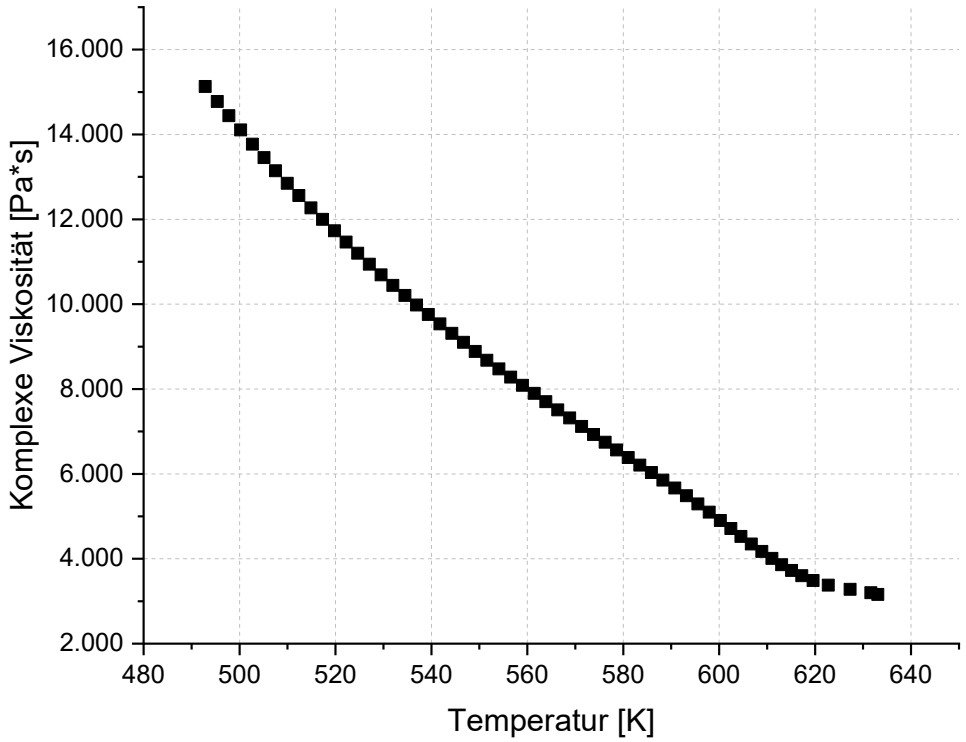



**Bild 62** Komplexe Viskosität der verwendeten Kunststoffe in Abhängigkeit der Temperatur

Durch eine Regression ergibt sich daraus für die Berechnung der komplexen Viskositätswerte Formel 7.4.

**7.4**

$$\eta * (T) = 0{,}2479 \cdot T^2 - 364{,}26 \cdot T + 134185$$

In dem einfachen Modell werden Verbrennungstemperaturen nicht berücksichtigt. Dies bedeutet, dass auch Viskositäten mit Temperaturen oberhalb der Verbrennungstemperatur von ca. 738 K für PA12 berechnet wurden. Oberhalb der Zersetzungstemperatur ist die Viskosität dementsprechend physikalisch nicht korrekt. Die lokale Temperatur in der Simulation kann allerdings in einigen Fällen größer sein, in der Realität würde in diesem Fall bereits Material abgetragen werden.

Die Temperaturwerte der Simulation wurden mit den Versuchen aus Kapitel 6.1 abgeglichen, wobei die mit dem Pyrometer gemessenen Temperaturen nach unten abweichen. Der Unterschied kann durch die Auflösung des Pyrometers erklärt werden Mit dem Pyrometer wird über einen Messfleck von rund 1 mm Durchmesser die Temperatur gemittelt. In der Simulation wurden die Temperaturen lokal mit linearen Finite-Elemente-Ansatzfunktionen berechnet. Die berechneten Temperaturwerte wurden nicht gemittelt, sondern stellen lokale Temperaturwerte dar. Diese können deshalb höher sein als die im Experiment über einen großen Bereich gemittelten Temperaturwerte. Außerdem wurden die

Temperaturen mit dem Pyrometer unter Angabe eines Emissionswert von eins vermessen, da der reale Emissionsgrad für PA12 nicht eindeutig bekannt ist. Dies kann dazu führen, dass niedrigere Temperaturen gemessen werden. Die Absorption und die Eindringtiefe von festem PA12 wurden für die Berechnung verwendet, auch wenn sich der Kunststoff bei den Temperaturen der Modellierung bereits im flüssigen Zustand befindet.

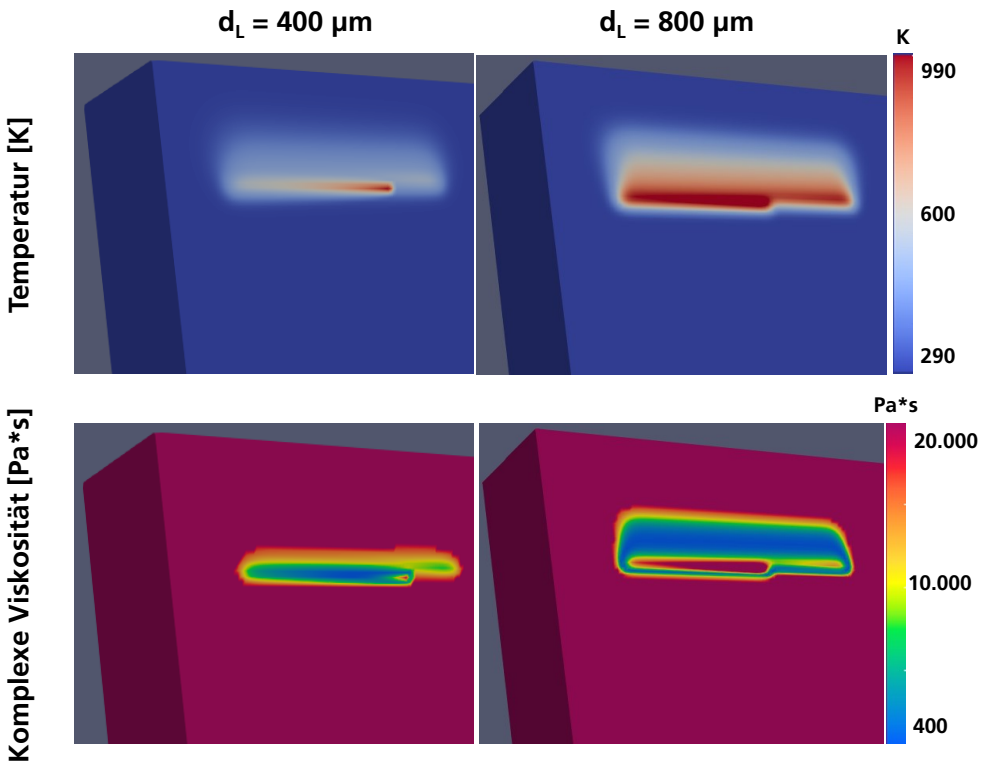



**Bild 63** Ergebnis der Modellierung zum Temperatur-gradienten und zur Viskosität beim laufenden Prozess des Laserpolierens von PA12

In Bild 63 ist der Bearbeitungsprozess bereits einige Linien weit fortgeschritten. Zu erkennen ist oben die Temperatur in Kelvin und unten die Viskosität in Pa*s. Auf der linken Seite ist ein Versuch mit 400 µm Laserstrahldurchmesser dargestellt (Parametersatz 1) und rechts mit 800 µm Durchmesser (Parametersatz 2). Wenn die Temperatur zu gering für eine Aufschmelzung war und nicht im Gültigkeitsbereich der Messkurve abgebildet werden konnte, wurde der Viskositätswert weit über den maximalen Wert gesetzt, um ihn von dem schmelzflüssigen Zustand abzusetzen. Das Modell zeigt, dass die Temperatur bereits nach einigen Bearbeitungslinien im Kunststoff erhalten bleibt, da die Wärmeleitfähigkeit der Kunststoffe im Vergleich zu Metallen o.Ä. sehr klein ist. Dies bedeutet auch, dass die schmelzflüssige Phase länger als nur während der Bestrahlung erhalten bleibt.

Mit größerem Laserstrahldurchmesser wird eine größere Fläche erwärmt. Die Probe heizt sich dementsprechend auf einen größeren Bereich auf und bei einer weiteren Überfahrt kann sich die Wärme akkumulieren. Bei dem Modell mit dem 400 µm großen Strahldurchmesser ist der Spurabstand gleich zu dem Modell mit dem 800 µm großen Strahldurchmesser. Hierdurch tritt bei einem 400 µm großen Strahldurchmesser eine verminderte Überlagerung statt. Dadurch entstehen für diese beiden Strahldurchmesser unterschiedlich ausgedehnte Bereiche mit einer geringen Viskosität. In der Mitte des Bearbeitungsfeldes liegt eine höhere Temperatur vor als in den Randbereichen. Durch die unterschiedlichen Viskositäten und Temperaturen kann der Kunststoff, der sich auch nach dem direkten Kontakt mit der Laserstrahlung im schmelzflüssigen Zustand befindet, unterschiedlich gut glatt gezogen werden durch die Oberflächenspannung. Die Wirkung der Oberflächenspannung auf das Laserpolieren hängt direkt mit der Viskosität zusammen. Aus diesem Grund kann man darauf schließen, dass die unterschiedliche Ausdehnung der Viskositätsbereiche einen Einfluss auf die Glättung hat. Dies kann dazu führen, dass im Material Spannungen entstehen, die zu Verformungen der Oberfläche führen und somit die Oberflächenrauheit, vor allem im hohen Ortswellenlängenbereich, erhöhen können. Der Gradient der Spannung, der durch die unterschiedlichen Oberflächenspannungen entsteht, ist im Fall des kleinen Strahldurchmessers geringer, sodass die Glättung erfolgreicher stattfinden kann. Dies bestätigt die Ergebnisse aus Kapitel 6.2.3.4, dass kleine Laserstrahldurchmesser zu einer glatteren Oberfläche führen im Rahmen der Untersuchung. Außerdem ist zu erkennen, dass die Temperatur bei dem kleinen Strahldurchmesser homogener ist als beim großen Strahldurchmesser, sodass gleichmäßiger Wärme in das Material geführt wird.

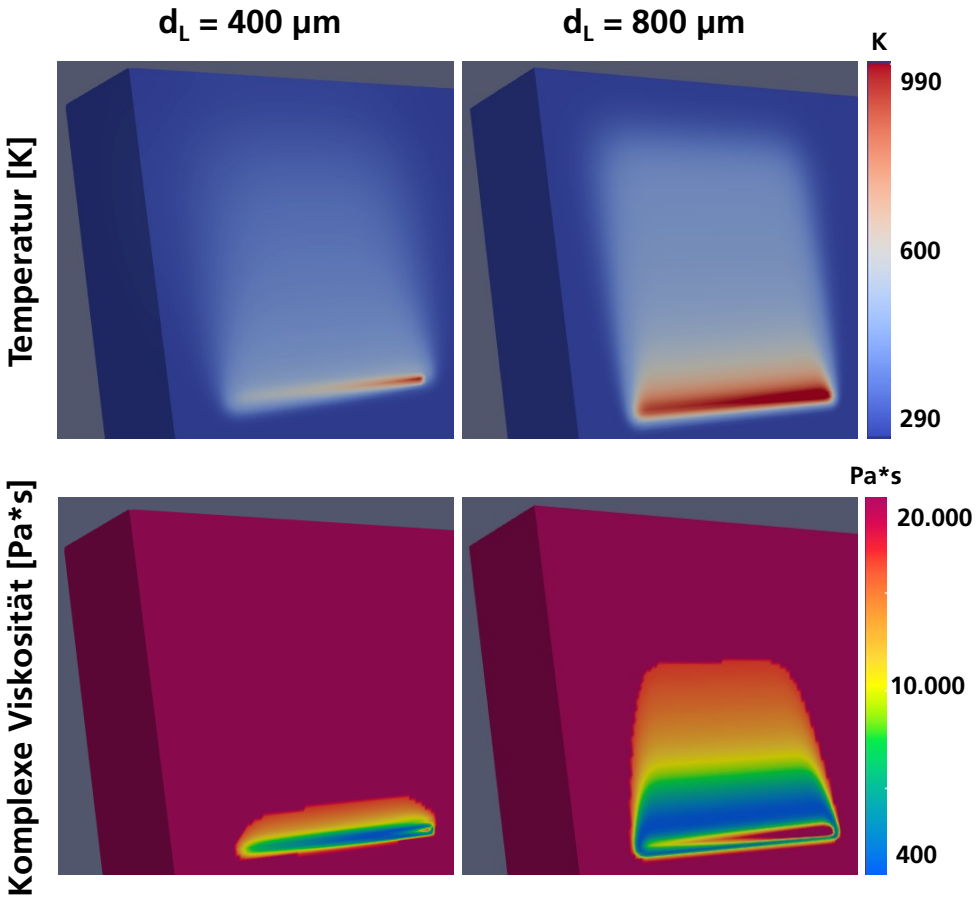



**Bild 64** Ergebnis der Modellierung zum Temperatur-gradienten und zur Viskosität beim abgeschlossenen Prozess des Laserpolierens von PA12

Der weiter fortgeschrittene Prozess ist in Bild 64 dargestellt für dieselben Parametersätze. Das Ergebnis bestätigt die bisherigen Erkenntnisse, da sich dieser Effekt durch die gesamte Bearbeitung zieht. Die Temperatur klingt für den Laserstrahldurchmesser von 400 µm schneller ab als für den großen Strahl-durchmesser, sodass die Viskosität während des Prozesses für den kleinen Strahldurchmesser homogener ist als für den großen Laserstrahldurchmesser.

Das Modell zeigt einen ungeregelten Prozess, der mit einer konstanten Laserleistung durchgeführt wird. In den experimentellen Versuchen wurde eine Temperaturregelung verwendet, um ein Aufheizen des Prozesses zu vermeiden. Dies gilt allerdings nur für die lokale Bearbeitungstemperatur direkt hinter dem Laserstrahl, sodass die Zieltemperatur im Bearbeitungsfleck nicht überschritten wird. Der Effekt, der im Modell sichtbar wird, ist auch mit der Temperaturregelung zu erwarten, da hier die gesamte Abkühlkurve im Prozess betrachtet wird und nicht ortsaufgelöst nur der Bearbeitungsbereich betrachtet wird. Der Einfluss der Prozessparameter, wie z.B. Spurüberlagerung oder Anzahl

der Überfahrten wurde in Kapitel 6.2 als nicht signifikant gewertet durch die Temperaturregelung, zeigte aber in Betrachtung der Ergebnisse einen kleinen Einfluss, der auf diese Gesamtbetrachtung des Bearbeitungsfeldes zurückzuführen ist.

# 8 Schlussfolgerung

Die Dissertation beantwortet zwei grundlegende Forschungsfragen und liefert damit einen Beitrag zum Verständnis des Laserpolierens additiv gefertigter Kunststoffe.

Welche Prozessparameter haben den größten Einfluss auf die Polierfähigkeit beim Laserpolieren von additiv gefertigten Kunststoffen?

In einer ersten Versuchsreihe wurden die Randbereiche der Parameter ermittelt und die Temperatur als einflussreicher Parameter identifiziert. Die Varianzanalyse in der zweiten Versuchsreihe zeigt, dass insgesamt die Temperatur den größten Einfluss auf den Laserpolierprozess aufweist. Direkt darauffolgend sind die Scangeschwindigkeit an zweiter Stelle und der Laserstrahldurchmesser an dritter Stelle. Der Laserstrahldurchmesser und die Scangeschwindigkeit sind weitestgehend für die Wechselwirkungszeit der Laserstrahlung mit dem Material verantwortlich und beeinflussen stark die Ausbildung des Schmelzbads. Zur Reduktion von Rauheit im hohen Ortswellenlängenbereich haben sich insgesamt andere Parameter als geeignet erwiesen als im niedrigen Ortswellenlängenbereich. Insgesamt bestätigte sich, dass in den hohen Ortswellenlängenbereichen ein größeres Potenzial zur Rauheitsreduktion liegt, da die Ausgangsrauheit höher ist.

Nach der Analyse mit einem anschließenden Tukey-Test wird deutlich, dass die Zieltemperatur bei PA12 innerhalb der Prozessgrenzen möglichst hoch gewählt werden sollte, um die Oberflächenrauheit streuungsarm zu reduzieren. Die Scangeschwindigkeit sollte möglichst klein gewählt werden, um die Wechselwirkung zwischen Strahlung und Material zu erhöhen und die Entstehung eines homogenen Schmelzbads zu unterstützen. Ebenso sollte der Laserstrahldurchmesser möglichst klein gewählt werden, um die Rauheitsreduktion zu maximieren.

Welche Randbedingungen sind bei der Kombination von Prozess- und Werkstoffparametern für eine hohe Rauheitsreduktion zu beachten?

Zur Betrachtung der Randbedingungen beim Laserpolieren wurde die Hypothese aufgestellt, dass die Rauheitsreduktion eine systematische Abhängigkeit zur Viskosität des Materials aufweist. Zu erwarten ist demnach, dass umso niedriger die Viskosität eines Materials ist, desto höher die erreichte Rauheitsreduktion beim Laserpolieren. Für Viskositäten oberhalb von $\eta^* = 500$ Pa*s konnte diese These für PLA und PP bestätigt werden, da in diesem Bereich für alle Ortswellenlängen eine Abnahme der Rauheitsreduktion stattfand. Für

Viskositäten unterhalb dieses Wertes nimmt die Rauheitsreduktion exponentiell ab. In diesem Bereich scheint die Kunststoffschmelze einen Grad an Fließfähigkeit erreicht zu haben, dass andere physikalische Effekte im Schmelzbad, wie z.B. die Oberflächenspannung, die Viskosität beim Glattziehen der Oberfläche nicht mehr überwinden können. Die Oberflächenspannung nimmt mit steigender Temperatur ebenso ab wie die Viskosität. Um eine geeignete Laserpolitur zu erreichen, muss das Verhältnis der beiden Größen stimmen. Dies wird vor allem in der Gegenüberstellung der Rauheitsreduktion über die Temperatur und die Viskosität deutlich. Dies bestätigt, dass der Temperaturgradient den größten Einfluss beim Prozess aufweist, da von diesem die Schmelzbadeigenschaften grundlegend abhängen. Aus diesem Grund kann auch nicht grundsätzlich von der Viskosität eines Materials auf die Laserpolierbarkeit geschlossen werden. So hat PLA z.B. die niedrigste Viskosität über den verwendeten Temperaturbereich, erreicht wird aber nur eine niedrigere Rauheitsreduktion als bei den Polyamiden. Insgesamt wurde für PLA aber die niedrigste Flächenrauheit erreicht, da auch die Ausgangsrauheit niedriger war. Für ABS konnte durchgehend keine Rauheitsreduktion erzielt werden. Polyamid 6 galt in der Literatur als nicht polierbar, dies wurde aber in dieser Untersuchung widerlegt, da auch hier Rauheitsreduktionen von über 95 % erreicht werden.

Die unterschiedlich gute Polierbarkeit der Kunststoffe kann sowohl in der Struktur ihre Gründe haben als auch im verwendeten Fertigungsverfahren. Die Unterschiede zwischen den Kunststoffen PA12, PA6 und PP, bei denen hohe Rauheitsreduktionen erreicht worden sind, und den Kunststoffen PLA und ABS sind zum einen das Fertigungsverfahren, zum anderen die strukturellen Eigenschaften.

PLA und ABS wurden mit dem FDM-Verfahren gefertigt und weisen eine weit niedrigere Ausgangsrauheit auf als die SLS-gefertigten Proben. Bei einer niedrigeren Ausgangsrauheit ist das Potenzial zur Rauheitsreduktion deutlich geringer, sodass die SLS-gefertigten Proben insgesamt eine größere Rauheitsreduktion ermöglichten. Bei PLA entspricht z.B. die maximal erzielte Rauheitsreduktion von 82 % einer Reduktion von 0,006 µm bei einer Ortswellenlänge von 6,25 – 12,5 µm. Bei PA12 entspricht die maximal erzielte Rauheitsreduktion von 95 % wiederum 0,1 µm in diesem Bereich.

Die Strukturen der Kunststoffe können ebenfalls einen Einfluss auf die Polierbarkeit haben. PA12, PA6 und PP sind teilkristalline Kunststoffe, die zwischen den knäuelförmig angeordneten Polymerketten kristalline Strukturen aufweisen. Diese haben oft eine höhere Schmelztemperatur als amorphe Kunststoffe. ABS ist ein amorpher Kunststoff, der gleichzeitig sehr komplex aufgebaut ist und aufgrund der drei verschiedenen Monomerbausteine allgemein schwer schmelzbar ist, was bereits der Versuch zur Bestimmung der Schmelztemperatur zeigt. PLA dagegen kann sowohl stark teilkristallin sein als

auch amorph, wobei für das verwendete Material keine Aussage getroffen werden kann.

Dies führt zu einer weiteren bei Kunststoffen bekannten Eigenschaft. Durch die stark variierenden Zusammensetzungen von Kunststoffen und dem Verhalten bei hohen Temperaturen (thermisches Gedächtnis [7]) können sowohl in der Vermessung der Stoffdaten, wie z.B. der Viskosität, als auch bei der Verarbeitung, wie z.B. beim Laserpolieren, Schwankungen auftreten. Diese lassen sich durch eine hinreichende Anzahl von Versuchen mit ausreichender Datenmenge statistisch ausgleichen.

Zusammenfassend lassen sich aus den Untersuchungen folgende Erkenntnisse festhalten:

- Für die Eingrenzung der Prozessparameter existiert ein optimaler Temperaturbereich zum Erreichen einer hohen Oberflächenreduktion beim Laserpolieren von Kunststoffen

- Die Temperatur, die Scangeschwindigkeit, der Laserstrahldurchmesser und die Probenfeuchtigkeit haben einen signifikanten Einfluss auf die Rauheitsreduktion beim Laserpolieren von PA12

- Die Temperatur hat den größten Einfluss auf die Rauheitsreduktion beim Laserpolieren von PA12

- Proben mit hoher Ausgangsrauheit haben ein größeres Potenzial zur Rauheitsreduktion

- Die Rauheitsreduktion steigt mit sinkender Viskosität bis runter zu einer Viskosität von 500 Pa*s

- Unter einer Viskosität von 500 Pa*s ist das Kräfteverhältnis aus Viskosität und Oberflächenspannung nicht mehr geeignet, die Oberfläche ausreichend zu glätten

- Der Temperaturgradient erweist sich als wichtigste Einflussgröße beim Laserpolieren von Kunststoffen, da dieser hauptsächlich die Schmelzbadeigenschaften und -Kräfte beeinflusst

Insgesamt wurde im Rahmen der Experimente qualitativ nachgewiesen, dass beim Laserpolieren additiv gefertigter Kunststoffe ein Zusammenspiel von Fließ-fähigkeit und Oberflächenspannung in Abhängigkeit des Temperaturgradienten existiert und einen essenziellen Einfluss auf das Ergebnis der Politur aufweist.

# 9 Ausblick

Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen haben das Zusammenspiel aus der Viskosität, der Oberflächenspannung und dem Temperaturgradienten ermittelt in Hinsicht auf das Ergebnis der Rauheitsreduktion beim Laserpolieren. Durch Untersuchungen mit Polyamid 12 wurden die Haupteinflussgrößen beim Prozess ermittelt, die alle einen direkten, systematischen Einfluss auf die Fließeigenschaften des Kunststoffs haben. Diese Erkenntnisse ergänzen den Stand der Technik, bieten aber noch großes Potenzial zum weiteren Ausbau des Prozessverständnisses. Bei der Messung der Viskosität können bei Kunststoffen Schwankungen entstehen, da die Eigenschaften selbst innerhalb einer Probe stark variieren können. Aus diesem Grund sind zur Bestimmung der Viskosität eine hinreichende Anzahl an Messungen pro Kunststoffprobe durchzuführen. Außerdem muss die Anzahl an Laserpolierversuchen erhöht werden, um eine genauere Aussage über wiederkehrende Rauheitscharakteristiken treffen zu können. Eine solche, ausgeweitete Studie steht für die Zukunft noch aus. Die Viskosität ist im Bearbeitungstemperaturbereich stark unterschiedlich zu der, die für das Laserpolieren aufgebracht werden muss. Dieser Aspekt sollte vor allem bei den künftigen Messungen der niedrigen Temperaturbereiche beachtet werden, da die Messungen für gewöhnlich mit der höchsten Temperatur beginnen, sodass hier bereits eine Stoffveränderung stattfindet, die die Messungen bei niedrigeren Temperaturen beeinflussen können.

Zur Abrundung der Erkenntnisse zu den notwendigen Randbedingungen aus Viskosität und Oberflächenspannung sollte in einem nächsten Schritt die Oberflächenspannung näher betrachtet und experimentell bestimmt werden. Die Vermessung der Oberflächenspannung bei Kunststoffschmelzen ist ein schwieriges Thema, da die Kunststoffe temperaturkonstant in der Schmelze gehalten werden müssen während der Messung und dies unter Umständen bereits zu einer Veränderung der Stoffeigenschaften führen kann und somit verfälschte Messergebnisse entstehen können. Der Weg über die Simulation der Oberflächenspannung ist mit den Erkenntnissen aus den Herstellerinformationen des Kunststoffes nur schwer realisierbar, da essenzielle Angaben fehlen, wie z.B. die Kettenlänge oder die exakte Zusammensetzung des Kunststoffes. Um die Oberflächenspannung zu bestimmen, ist also eine verstärkte Zusammenarbeit mit Kunststoffherstellern notwendig, die ggf. in Forschungsprojekten entstehen kann. Laut Angaben der Hersteller sind diese Informationen unter Geheimhaltung bei den Firmen.

Zusätzlich zu der Viskosität sollte für zukünftige Versuche die Auswahl der Kunststoffe genauer betrachtet werden. Einige Materialien wurden ausschließlich über das SLS-Herstellungsverfahren angeboten und einige über

das FDM-Verfahren. Der große Effekt des Fertigungsverfahren auf die Oberflächenrauheit wurde zu Beginn der Arbeit als vernachlässigbar angesehen, da nur die Rauheitsreduktion betrachtet werden sollte und nicht die absoluten Rauheitskennwerte. Herausgestellt hat sich aber, dass die Rauheitsreduktion bei allen SLS-gefertigten Proben deutlich höher ausgefallen ist als bei den FDM-gefertigten Proben. Zudem sollte tiefer auf die Struktur der Kunststoffe eingegangen werden, um die Unterschiede teilkristalliner und amorpher Kunststoffe näher zu betrachten.

Konkret könnten im Anschluss an diese Dissertation Untersuchungen mit dem Ziel stattfinden, die Kräfte, die durch die Oberflächenspannung bei lokaler Bestrahlung, wirken, zu identifizieren und qualitativ zu analysieren. In diesem Rahmen kann eine fluiddynamische Simulation hilfreich sein, um die Effekte ausreichend zu beschreiben. Die Schmelzbadbewegungen könnte z.B. durch hochauflösende Hochgeschwindigkeitskameras aufgenommen werden. Diese Untersuchungen können sowohl als Grundlagenexperimente stattfinden als auch in anderen öffentlichen Projekten in direktem Bezug zu einer Optimierung des Laserpolierens für konkrete Anwendungs- und Spezifikationsbereiche.

# 10 Literaturverzeichnis


[1] M. Schmid, *Selektives Lasersintern (SLS) mit Kunststoffen: Technologie, Prozesse und Werkstoffe*. München: Hanser, 2015. [Online]. Available: http://sub-hh.ciando.com/book/?bok_id=2006293

[2] Sculpteo, *The State of 3D Printing*, 2020.

[3] C. Hopmann, H. Greif, and L. Wolters, *Technologie der Kunststoffe: Lern- und Arbeitsbuch für die Aus- und Weiterbildung,* 5th ed. München: Hanser, 2021.

[4] P. Eyerer and H. Schüle, *Polymer Engineering 1: Einführung, Synthese, Eigenschaften,* 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint: Springer Vieweg, 2020.

[5] G. Abts, *Kunststoff-Wissen für Einsteiger: Grundlagen, Eigenschaften und Recycling polymerer Werkstoffe,* 4th ed. München: Hanser, 2020.

[6] C. Bonten, *Kunststofftechnik: Einführung und Grundlagen*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014. [Online]. Available: http://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446441712

[7] T. Schröder, *Rheologie der Kunststoffe: Theorie und Praxis*. München: Hanser, 2018.

[8] Chuck Hull, "Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography," 4,575,330.

[9] Sculpteo, "Sculpteo State of 3D Printing - 2018," vol. 2018.

[10] M. Schmid, *Additive Fertigung mit selektivem Lasersintern (SLS): Prozess- und Werkstoffüberblick*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. [Online]. Available: http://www.springer.com/

[11] E. Baur, S. Brinkmann, T. A. Osswald, and E. Schmachtenberg, *Saechtling Kunststoff Taschenbuch,* 31st ed. München: Hanser, 2013. [Online]. Available: http://www.hanser-elibrary.com/action/showBook?doi=10.3139/9783446437296

[12] E. Willenborg, *Polieren von Werkzeugstählen mit Laserstrahlung*. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2005. Aachen: Shaker Verlag; Shaker, 2006.

[13] A. Richmann, *Polieren von Gläsern und Kunststoffen mit CO2-Laserstrahlung*. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2013. Aachen: Shaker, 2013.

[14] P. A. Temple, Lowdermilk W.H., and Milam D., "Carbon dioxide laser polishing of fused silica surfaces for increased la-ser-damage resistance at 1064 nm," *Applied Optics*, vol. 1982, no. 21, 1982.

[15] Y. Chai, R. W. Li, D. M. Perriman, S. Chen, Q.-H. Qin, and P. N. Smith, "Laser polishing of thermoplastics fabricated using fused deposition modelling," *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 96, 9-12, pp. 4295–4302, 2018, doi: 10.1007/s00170-018-1901-5.

[16] T. Gumpenberger, J. Heitz, D. Bäuerle, and T. C. Rosenmayer, "F 2 -laser polishing of polytetrafluoroethylene surfaces," *Europhys. Lett.*, vol. 70, no. 6, pp. 831–835, 2005, doi: 10.1209/epl/i2005-10037-y.

[17] M. Layher, A. Hopf, L. Eckhardt, and J. Bliedtner, "Laser Beam Polishing of Polymers," *PhotonicsViews*, vol. 16, no. 3, pp. 83–87, 2019, doi: 10.1002/phvs.201900025.

[18] K. Braun, E. Willenborg, and J. H. Schleifenbaum, "Laser polishing as a new post process for 3D-printed polymer parts," *Procedia CIRP*, vol. 94, pp. 134–138, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.09.026.
[19] K. Braun, "Laserpolieren von additiv gefertigten Kunststoffbauteilen," Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen.
[20] *Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit - DIN EN ISO 4288*, EN ISO 4288, Deutsches Institut für Normung e.V. •, 1997.
[21] R. Volk and D. D. I. f. N. e.V., *Rauheitsmessung: Theorie und Praxis,* 3rd ed. Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag, 2018. [Online]. Available: https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=5431652
[22] *Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren Meßtechnische Eigenschaften von phasenkorrekten Filtern*, DIN EN ISO 11562, Sep. 1998.
[23] *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit (ISO 4287:1997 + Cor 1:1998 + Cor 2:2005 + Amd 1:2009)*, DIN EN ISO 4287, Deutsches Institut für Normung, Jul. 2010.
[24] *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 2: Begriffe und Oberflächen-Kenngrößen*, DIN EN ISO 25178-2, Deutsches Institut für Normung e.V., Sep. 2012.
[25] *Tagungsband*: AMA Service GmbH, Von-Münchhausen-Str. 49, 31515 Wunstorf, Germany, May. 2012 - May. 2012.
[26] W. Demtröder, *Elektrizität und Optik,* 7th ed. Berlin: Springer, 2017. [Online]. Available: http://www.springer.com/de/book/9783662557907
[27] Zygo Corporation, "NewView 7300 Specifications," 2008.
[28] W. Kleppmann, *Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren,* 10th ed. München: Hanser, 2020.
[29] H. Mann, H. Schiffelgen, and R. Froriep, *Einführung in die Regelungstechnik: Analoge und digitale Regelung, Fuzzy-Regler, Regler-Realisierung, Software,* 11th ed. München: Hanser, 2009.
[30] H. Dominghaus, *Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften,* 5th ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 1998.
[31] Netzsch-Gerätebau GmbH, "Poster: Thermal properties of Polymers," 2021.
[32] P. Hejmady, L. C. van Breemen, D. Hermida-Merino, P. D. Anderson, and R. Cardinaels, "Laser sintering of PA12 particles studied by in-situ optical, thermal and X-ray characterization," *Additive Manufacturing*, vol. 52, p. 102624, 2022, doi: 10.1016/j.addma.2022.102624.
[33] Coherent, Inc., "Laserdatenblatt - COHR_DIAMOND_Cx-10_DS_0118_1," o.D.
[34] Scanlab GmbH, "Datenblatt Laserscanner intelliSCAN," 2021.
[35] G. W. Ehrenstein, *Strukturverhalten: Struktur und Eigenschaften von Kunststoffen, Oberflächenspannung, Spannungsrisse*. München: Hanser, 2021.
[36] W. Wagner, *Chemische Thermodynamik*. Wiesbaden: Springer Vieweg. in Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 1975. [Online]. Available: https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6864431

[37] R. Poprawe, *Lasertechnik für die Fertigung: Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur ; mit 26 Tabellen*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005.
[38] G. Taguchi, H. Yano, S. Chowdhury, and S. Taguchi, *Taguchi's quality engineering handbook*. Hoboken, N.J, Livonia, Mich: John Wiley & Sons, 2005. [Online]. Available: http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/9780470258354
[39] T. Kuhlenkasper and A. Handl, *Einführung in die statistische Auswertung von Experimenten: Theorie und Praxis mit R,* 1st ed. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, 2019.
[40] MiniTab, *Support für Minitab 18.* [Online]. Available: https://support.minitab.com/de-de/minitab/18/ (accessed: Aug. 23 2023).
[41] F. Helmut.Lütkepohl, "The Role of the Log Transformation in Forecasting Economic Variables," *CESifo Working Paper*, vol. 2009, no. 2591, 2009.
[42] M. J. McLaughlin and K. L. Sainani, "Bonferroni, Holm, and Hochberg corrections: fun names, serious changes to p values," *PM & R : the journal of injury, function, and rehabilitation*, vol. 6, no. 6, pp. 544–546, 2014, doi: 10.1016/j.pmrj.2014.04.006.
[43] R. Galata, *Empirische Wirtschaftsforschung: Grundlagen – Methoden – Beispiele*. München: Fachbuchverl. Leipzig, 2013.
[44] A. Nanda, B. B. Mohapatra, A. P. K. Mahapatra, A. P. K. Mahapatra, and A. P. K. Mahapatra, "Multiple comparison test by Tukey's honestly significant difference (HSD): Do the confident level control type I error," *Int. J. Stat. Appl. Math.*, vol. 6, no. 1, pp. 59–65, 2021, doi: 10.22271/maths.2021.v6.i1a.636.
[45] 3D Activation GmbH, "Materialdatenblatt FDM_PA2200-PA12," 2021.
[46] *Nylon 12*. [Online]. Available: http://polymerdatabase.com/polymers/nylon12.html (accessed: Jun. 3 2022).
[47] Schorpp Gerätetechnik, *Datenblatt und Bedienungsanleitung Schmelzpunktbestimmungsgerät MPM-H3*, 2023.
[48] 3D Activation GmbH, "Materialdatenblatt FDM_ABS," 2021.
[49] 3D Activation GmbH, "Materialdatenblatt FDM_PLA," 2021.
[50] 3D Activation GmbH, "Materialdatenblatt PC," 2021.
[51] 3D Activation GmbH, "Materialdatenblatt PP," 2021.
[52] W. P. Cox and E. H. Merz, "Correlation of dynamic and steady flow viscosities," *J. Polym. Sci.*, vol. 28, no. 118, pp. 619–622, 1958, doi: 10.1002/pol.1958.1202811812.
[53] E. Meyer, *Schwingungslehre*. Wiesbaden: Springer Vieweg. in Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 1974. [Online]. Available: https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6857389
[54] M. Schweier, *Simulative und experimentelle Untersuchungen zum Laserschweißen mit Strahloszillation*. München: utzverlag, 2015. [Online]. Available: https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6897430
[55] A. Logg and G. N. Wells, "DOLFIN," *ACM Trans. Math. Softw.*, vol. 37, no. 2, pp. 1–28, 2010, doi: 10.1145/1731022.1731030.

# 11 Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

ABS ..... *Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer*
ANOVA ..... *Analysis of variance*
AOM ..... akustooptischer Modulator
b ..... *Spurbreite*
$d_L$ ..... *Laserstrahldurchmesser*
DOE ..... *Design of experiments*
dy ..... *Spurüberlagerung*
F ..... *Probenfeuchtigkeit*
FDM ..... *Fused Deposition Modeling*
FLM ..... Fused Layer Modeling
$F_{Prüf}$ ..... *Signifikanzniveau der ANOVA*
h ..... *Höhe des Bearbeitungsfeldes*
IQR ..... *Interquartilsabstand*
LZI ..... Lineares zeitinvariantes System
n ..... *Anzahl Überfahrten*
PA ..... *Polyamid*
PA12 ..... *Polyamid 12*
PA6 ..... *Polyamid 6*
PE ..... *Polyethylen*
PEEK ..... *Polyetheretherketon*
PID-Regler ..... *Proportional-Integral-Differential-Regler*
$P_L$ ..... *Laserleistung*
PLA ..... Polylactid
PMMA ..... *Polymethylmethacrylat*
PP ..... *Polypropylen*
Ra ..... *Arithmetischer Rauheitswert*
Rq ..... *Rauheitswert der durchschnittlichen quadratischen Abweichung*
Sa ..... *Arithmetische Flächenrauheit*
SAN ..... *Styrol-Acrylnitril-Copolymere*
SLA ..... *Stereolithografie*
SLS ..... *Selektives Lasersintern*
SPS ..... speicherprogrammierbare Steuerung
$t_P$ ..... *Pausenzeit zwischen zwei Überfahrten*
TPU ..... *Thermoplastisches Polyurethan*
$T_{PYRO}$ ..... *Gemessene Temperatur mit Emissionsgrad = 1*
$T_{Schmelz}$ ..... *Schmelztemperatur*
$T_{SOLL}$ ..... *Zieltemperatur*
$t_w$ ..... *Wechselwirkungszeit*
$T_{Zersetzung}$ ..... *Zersetzungstemperatur*
vB ..... *visuelle Bewertung*
$v_{scan}$ ..... *Scangeschwindigkeit*
WLI ..... *Weißlichtinterferometrie*

# 12 Anhang

## 12.1 Orthogonaler L50-Versuchsplan nach Taguchi

Der orthogonale L50-Versuchsplan nach Taguchi kann für zwölf Faktoren verwendet werden. Ein Faktor kann mit zwei Stufen verwendet werden, die anderen elf mit fünf Stufen.

Der Versuchsplan kann https://www.york.ac.uk/depts/maths/tables/l50.htm unter dieser Homepage eingesehen werden und basiert auf TAGUCHI, SYS. OF EXP. DES., VOL. 2, PAGE 1174.

| | Faktoren | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Versuche | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Nr. 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Nr. 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Nr. 3 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Nr. 4 | 1 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Nr. 5 | 1 | 1 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Nr. 6 | 1 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Nr. 7 | 1 | 2 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 |
| Nr. 8 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 |
| Nr. 9 | 1 | 2 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 |
| Nr. 10 | 1 | 2 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Nr. 11 | 1 | 3 | 1 | 3 | 5 | 2 | 4 | 4 | 1 | 3 | 5 | 2 |
| Nr. 12 | 1 | 3 | 2 | 4 | 1 | 3 | 5 | 5 | 2 | 4 | 1 | 3 |
| Nr. 13 | 1 | 3 | 3 | 5 | 2 | 4 | 1 | 1 | 3 | 5 | 2 | 4 |
| Nr. 14 | 1 | 3 | 4 | 1 | 3 | 5 | 2 | 2 | 4 | 1 | 3 | 5 |
| Nr. 15 | 1 | 3 | 5 | 2 | 4 | 1 | 3 | 3 | 5 | 2 | 4 | 1 |
| Nr. 16 | 1 | 4 | 1 | 4 | 2 | 5 | 3 | 5 | 3 | 1 | 4 | 2 |
| Nr. 17 | 1 | 4 | 2 | 5 | 3 | 1 | 4 | 1 | 4 | 2 | 5 | 3 |
| Nr. 18 | 1 | 4 | 3 | 1 | 4 | 2 | 5 | 2 | 5 | 3 | 1 | 4 |
| Nr. 19 | 1 | 4 | 4 | 2 | 5 | 3 | 1 | 3 | 1 | 4 | 2 | 5 |
| Nr. 20 | 1 | 4 | 5 | 3 | 1 | 4 | 2 | 4 | 2 | 5 | 3 | 1 |

| | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nr. 21 | 1 | 5 | 1 | 5 | 4 | 3 | 2 | 4 | 3 | 2 | 1 | 5 |
| Nr. 22 | 1 | 5 | 2 | 1 | 5 | 4 | 3 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| Nr. 23 | 1 | 5 | 3 | 2 | 1 | 5 | 4 | 1 | 5 | 4 | 3 | 2 |
| Nr. 24 | 1 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 5 | 2 | 1 | 5 | 4 | 3 |
| Nr. 25 | 1 | 5 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 5 | 4 |
| Nr. 26 | 2 | 1 | 1 | 1 | 4 | 5 | 4 | 3 | 2 | 5 | 2 | 3 |
| Nr. 27 | 2 | 1 | 2 | 2 | 5 | 1 | 5 | 4 | 3 | 1 | 3 | 4 |
| Nr. 28 | 2 | 1 | 3 | 3 | 1 | 2 | 1 | 5 | 4 | 2 | 4 | 5 |
| Nr. 29 | 2 | 1 | 4 | 4 | 2 | 3 | 2 | 1 | 5 | 3 | 5 | 1 |
| Nr. 30 | 2 | 1 | 5 | 5 | 3 | 4 | 3 | 2 | 1 | 4 | 1 | 2 |
| Nr. 31 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 3 | 3 | 2 | 4 | 5 | 5 | 4 |
| Nr. 32 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 4 | 4 | 3 | 5 | 1 | 1 | 5 |
| Nr. 33 | 2 | 2 | 3 | 4 | 3 | 5 | 5 | 4 | 1 | 2 | 2 | 1 |
| Nr. 34 | 2 | 2 | 4 | 5 | 4 | 1 | 1 | 5 | 2 | 3 | 3 | 2 |
| Nr. 35 | 2 | 2 | 5 | 1 | 5 | 2 | 2 | 1 | 3 | 4 | 4 | 3 |
| Nr. 36 | 2 | 3 | 1 | 3 | 3 | 1 | 2 | 5 | 5 | 4 | 2 | 4 |
| Nr. 37 | 2 | 3 | 2 | 4 | 4 | 2 | 3 | 1 | 1 | 5 | 3 | 5 |
| Nr. 38 | 2 | 3 | 3 | 5 | 5 | 3 | 4 | 2 | 2 | 1 | 4 | 1 |
| Nr. 39 | 2 | 3 | 4 | 1 | 1 | 4 | 5 | 3 | 3 | 2 | 5 | 2 |
| Nr. 40 | 2 | 3 | 5 | 2 | 2 | 5 | 1 | 4 | 4 | 3 | 1 | 3 |
| Nr. 41 | 2 | 4 | 1 | 4 | 5 | 4 | 1 | 2 | 5 | 2 | 3 | 3 |
| Nr. 42 | 2 | 4 | 2 | 5 | 1 | 5 | 2 | 3 | 1 | 3 | 4 | 4 |
| Nr. 43 | 2 | 4 | 3 | 1 | 2 | 1 | 3 | 4 | 2 | 4 | 5 | 5 |
| Nr. 44 | 2 | 4 | 4 | 2 | 3 | 2 | 4 | 5 | 3 | 5 | 1 | 1 |
| Nr. 45 | 2 | 4 | 5 | 3 | 4 | 3 | 5 | 1 | 4 | 1 | 2 | 2 |
| Nr. 46 | 2 | 5 | 1 | 5 | 2 | 2 | 5 | 3 | 4 | 4 | 3 | 1 |
| Nr. 47 | 2 | 5 | 2 | 1 | 3 | 3 | 1 | 4 | 5 | 5 | 4 | 2 |
| Nr. 48 | 2 | 5 | 3 | 2 | 4 | 4 | 2 | 5 | 1 | 1 | 5 | 3 |
| Nr. 49 | 2 | 5 | 4 | 3 | 5 | 5 | 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 4 |
| Nr. 50 | 2 | 5 | 5 | 4 | 1 | 1 | 4 | 2 | 3 | 3 | 2 | 5 |

## 12.2 Modellbildung zur Analyse des Temperaturgradienten

### 12.2.1 Parameter zur Modellberechnung

Probengeometrie: 30 mm x 30 mm x 5 mm
Auflösung: 200 x 200 x 15
Dichte: 1,02 g/cm³
Spezifische Wärmekapazität: 1,2 kJ/KgK
Wärmeleitfähigkeit: 0,22 W/mK
Eindringtiefe: 300 µm
Schmelztemperaturbereich Beginn:451 K
Absorption: 0,946

### 12.2.2 Ergänzende Ergebnisse der Modellbildung

#### 12.2.2.1 **Ergebnisse**

**Bild 65**
Schmelzenthalpie in Abhängigkeit der Temperatur

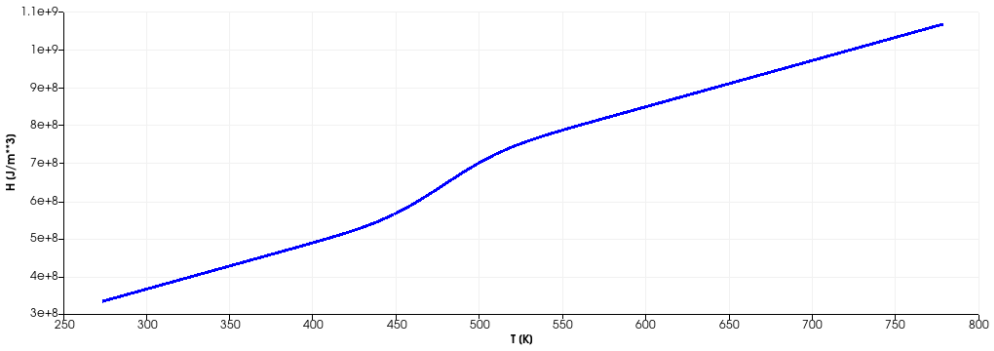



**Bild 66**
Isentropenexponent in Abhängigkeit der Temperatur

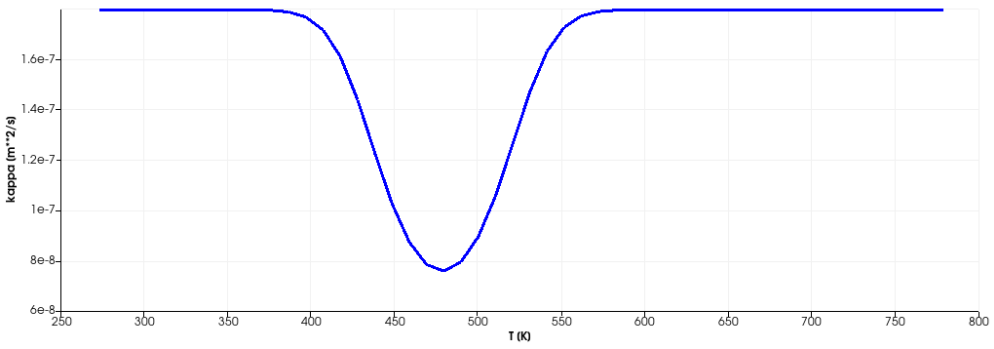


**Tabelle 18**
Prozessparameter für die Modellierung in Bild 67

| Prozessparameter | Parametersatz 3 |
|---|---|
| Laserstrahldurchmesser | 800 µm |
| Scangeschwindigkeit | 200 mm/s |
| Spurabstand | 400 µm |
| Material | PA12 |
| Laserleistung | 12 W |

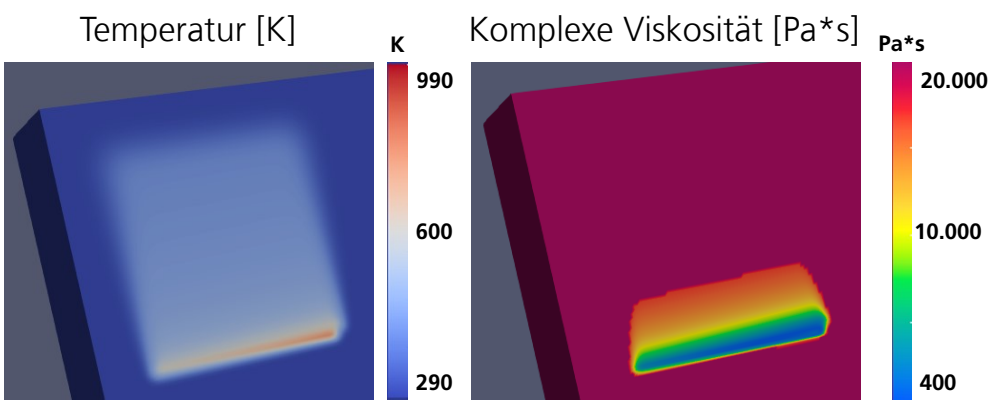



**Bild 67** Modell zum Temperaturgradienten und zur Viskosität beim Laserpolieren von PA12

# Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand neben meiner Tätigkeit am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT in Aachen. An dieser Stelle möchte ich mich bei all denen bedanken, die mich während meiner Promotion und bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben.

Ein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Arnold Gillner für die Übernahme der Betreuung dieser Arbeit. Ohne diese engagierte fachliche und unterstützende Betreuung wäre der Abschluss dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

Außerdem möchte ich Prof. Dr. Christian Hopmann für die Übernahme des Koreferats danken sowie Prof. Dr. Christoph Broeckmann für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Mein Dank gilt auch all meinen Kollegen und Kolleginnen, die mich während der Zeit begleitet und stets mit mir über Ergebnisse und Versuche diskutiert haben. Ganz besonders danke ich hier Peter Abels für die durchgehenden fachlichen Diskussionen, das Korrekturlesen und das Aufrechterhalten meiner Motivation zur Beendigung der Dissertation sowie für das stets offene Ohr für meinen Frust und meine Sorgen. Ein großer Dank geht außerdem an meine fleißigen Studenten Timo Mangels und Moritz Battermann für das außergewöhnliche Engagement, die Unterstützung bei den experimentellen Arbeiten und vielen Diskussionen. Ebenfalls danke ich Dr. Markus Niessen für die unermüdliche Hilfe zu den physikalischen Aspekten und bei der Simulation. Außerdem möchte ich meinen Dank an Dr. Edgar Willenborg und Dr. Karsten Braun hervorheben für die Bereitstellung der Laseranlage und des Themas aus ihrer Arbeitsgruppe und die Unterstützung bei den vielen Fragen zum Laserpolieren.

Zu guter Letzt geht ein besonderer Dank an meine Familie, die mich stets unterstützt und an mich geglaubt hat. An dieser Stelle danke ich außerdem meinem Partner und meinen Freunden, die vor allem auf der Zielgeraden viel Geduld mit mir hatten, mich emotional unterstützt haben und sich viele Aspekte der Arbeit und auch des Promotionsvortrags mehr als einmal anhören mussten.