

# Optimierung der Bearbeitungsstrategie für scannerbasierte Materialbearbeitungsprozesse mit Ultrakurzpulslasern

A. Fehrenbacher, M. Sailer, C. Eberhardt, S. Rübling, A. Budnicki, D. H. Sutter  
TRUMPF Laser GmbH, Aichhalder Straße 39, 78713 Schramberg

Das Ziel dieser Arbeit ist es bei der Materialbearbeitung mit Ultrakurzpulslasern und Galvo-Scansystemen sowohl die Prozesszeit zu minimieren als auch die Bearbeitungsqualität zu maximieren. Unter Betrachtung des Gesamtsystems aus Laser und Scanner wird unter Variation der zeitlichen und räumlichen Energieeinbringung die Bearbeitungsstrategie optimiert. Anhand von Simulationen werden Einflüsse auf die Prozesszeit wie Scangeschwindigkeit, Regelungsstrategie des Scannersystems, Position Synchronized Output (PSO) analysiert. Weiterhin wird durch reale Applikationsversuche die Bearbeitungsqualität bestimmt und komplexe Zusammenhänge dargestellt.

## 1. Einleitung

Bei der Materialbearbeitung mit Ultrakurzpulslasern (UKPL) liegt der Fokus häufig auf dem Laser und den Bearbeitungsparametern, die durch den UKPL festgelegt werden wie Pulsenergie, Repetitionsrate, Pulsdauer etc. Es existieren darüber hinaus jedoch weitere Einflussgrößen der Systemtechnik, die einen bedeutenden Einfluss auf das Bearbeitungsergebnis haben können: Parameter, die von Komponenten wie Strahlführung, Bearbeitungsoptik, Vorrichtung und deren Kombination stammen. Für die bestmögliche Erfüllung der Anforderungen sowie der Umsetzung einer hohen Prozesseffizienz und -qualität ist es notwendig, sowohl den UKPL als auch die komplette Systemtechnik zu betrachten.

In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt auf dem Galvo-Scannersystem, insbesondere den damit verbundenen Einflussgrößen auf die Applikation. Das Ziel dabei ist ein effizienter Einsatz von UKP Strahlquellen mit Scannern und die damit verbundene Reduzierung von Prozesszeiten bei einer gleichzeitig hohen Bearbeitungsqualität unter Berücksichtigung höherer mittlerer Leistungen. Zur Erreichung des Ziels wird in Betracht der Interaktion zwischen Laser und Scannersystem die zeitliche Energieeinbringung, insbesondere die Scangeschwindigkeit sowie die Regelungsstrategie und Triggermodus des Scannersystems variiert. Position Synchronized Output (PSO) ermöglicht durch *flexible Pulse on Demand* des UKPL einen konstanten Spotabstand und konstanten Energieeintrag [1]. Bei der Umsetzung von PSO werden weitere Vorteile und Limitationen für den Prozess aufgezeigt, sowie Abhängigkeiten erläutert. In der Literatur erhält dieses Thema typischerweise weniger Beachtung. Nyenhuis et al. untersuchte den Einfluss der Scanspeed in Theorie und Praxis und präsentierte eine zweistufige Prozessstrategie zur Verbesserung der Qualität und Produktivität auf einem intelliSCAN Scannersystem [2].

Zunächst wird anhand einer Simulation die Prozesszeit berechnet und anschließend die erreichte Qualität bei der Materialbearbeitung analysiert und Zusammenhänge dargestellt.

## 2. Simulation

Die notwendige Prozesszeit bestimmt im Wesentlichen die Wirtschaftlichkeit eines Bearbeitungsprozesses. Eine der konventionellen Bearbeitungsmethoden für eine Tiefengravur ist die alternierende Linienstraffung, die im Folgenden untersucht wird.

Für einen Tiefenabtrag eines Quadrats mit Seitenlänge  $d_e$  ist die Prozesszeit  $\tau_{total}$  abhängig von der gewünschten Gravurtiefe  $d_t$ , der Abtragtiefe pro Layer  $d_{layer}$  und der Prozesszeit pro Layer  $\tau_{layer}$ .  $\tau_{layer}$  berechnet sich über die Linienanzahl pro Layer  $d_e/d_h$  mit Linienabstand  $d_h$  und der Prozesszeit pro Linie  $\tau_{line}$ :

$$\tau_{total} = \frac{d_t}{d_{layer}} \tau_{layer} = \frac{d_t d_e \tau_{line}}{d_{layer} d_h}$$

Die Abtragtiefe pro Layer  $d_{layer}$  wird über das Abtragsvolumen pro Energie  $V/Q$ , der Frequenz  $f$ , der Pulsenergie  $E_p$ , den Linienabstand  $d_h$  und die Scangeschwindigkeit  $v_s$  berechnet [2]:

$$d_{layer} = \frac{f}{d_h v_s} E_p \frac{V}{Q}$$

In einem Bearbeitungsprozess mit einem Galvo-Scannersystem ist für jede abzutragende Linie ein Bearbeitungsvektor und ein Sprungvektor notwendig. In der Mikrobearbeitung werden bei einem UKPL mit konstanter Repetitionsrate zusätzlich Pre- und Postvektoren für jeden Bearbeitungsvektor eingesetzt. Durch die Verlagerung der Beschleunigungs- und Abbremsphase in den Pre- und Postvektor wird eine konstante Scangeschwindigkeit und somit ein konstanter Energieeintrag entlang des Bearbeitungsvektors erreicht. Der Einsatz von Pre- und Postvektoren wirkt sich positiv auf die Bearbeitungsqualität, aber negativ auf die Prozesszeit aus.

Bei Verwendung des Galvo-Scannersystems intelliSCAN des Herstellers SCANLAB ist die Zeit pro Linie  $\tau_{line.in}$  durch die Bearbeitungsvektorzeit  $d_e/v_s$ , Pre- und Postvektorzeit  $2\tau_{pfo}$  und der Sprungvektorzeit  $d_h/v_s$  bestimmt. Von besonderem Interesse ist die Regelungsstrategie des intelliSCAN Galvo-Scannersystems, das auf einer konstanten Beschleunigungszeit  $\tau_a$  basiert und die Pre- und Postvektorzeit bestimmt:

$$\tau_{line\_in} = \frac{d_e}{v_s} + 2\tau_a + \frac{d_h}{v_s}$$

Durch den Wechsel des Galvometersystems von intelliSCAN auf excelliSCAN wird die Regelungsstrategie geändert. Das excelliSCAN Regelungssystem zeichnet sich durch eine konstante Beschleunigung  $a_s$  aus. Die Prozesszeit pro Linie  $\tau_{line\_ex}$  berechnet sich hierbei durch die Bearbeitungsvektorzeit  $d_e/v_s$ , Pre- und Postvektorzeit  $2v_s/a_s$  und der Sprungvektorzeit  $2\sqrt{d_h/a_s}$ :

$$\tau_{line\_ex} = \frac{d_e}{v_s} + 2\frac{v_s}{a_s} + 2\sqrt{\frac{d_h}{a_s}}$$

In der nächsten Simulation wird ein excelliSCAN in Kombination mit PSO analysiert. Die Funktionalität PSO ermöglicht einen konstanten Energieeintrag entlang des Bearbeitungsvektors bei variabler Scangeschwindigkeit. Die Notwendigkeit von Pre- und Postvektoren entfällt und die Nebenzeiten reduzieren sich. Die Berechnung der Bearbeitungsvektorzeit ist abhängig von der auf dem Bearbeitungsvektor maximal erreichbaren Geschwindigkeit  $v_{s,v,max}$ .

$$v_{s,v,max} = a_s \sqrt{\frac{d_e}{a_s}}$$

$$\tau_{line\_ex\_ps0} = \begin{cases} 2\frac{v_s}{a_s} + \frac{d_e - \frac{v_s^2}{a_s}}{v_s} + 2\sqrt{\frac{d_h}{a_s}} & \text{if } v_s < v_{s,v,max} \\ 2\frac{v_{s,v,max}}{a_s} + 2\sqrt{\frac{d_h}{a_s}} & \text{if } v_s \geq v_{s,v,max} \end{cases}$$

Für die Simulation werden die in Tabelle 1 aufgeführten Größen verwendet, dieses exemplarische Beispiel ist jedoch nicht allgemein gültig. Die ermittelte Prozesszeit und deren Reduktion durch die vorgestellten Änderungen ist wesentlich abhängig von Prozesseigenschaften wie die Verteilung der Bearbeitungsvektorlängen, die Verteilung der Sprungvektorlängen, der Konturtreue und des Spotabstandes. Für den beschriebenen Fall und der in vorausgegangenen Versuchen bestimmten Abtragseffizienz für Edelstahl wird eine Abtragtiefe von 170  $\mu\text{m}$  prognostiziert.

Tabelle 1: Für die Simulation und Materialbearbeitung verwendete Größen der Tiefengravur auf Edelstahl.

Seitenlänge Quadrat $d_e$	1 mm
Linienabstand $d_h$	10 $\mu\text{m}$
Gravurtiefe $d_t$	170 $\mu\text{m}$
Abtragsvolumen pro Energie $V/Q$	4 $\text{mm}^3/\text{kJ}$
Frequenz $f$	1 MHz
Pulsenergie $E_p$	7 $\mu\text{J}$
Brennweite	100 mm
intelliSCAN	
Beschleunigungszeit $\tau_a$	400 $\mu\text{s}$
Tuning	Vector
excelliSCAN	
Beschleunigung $a_s$	31 $\text{km/s}^2$

### 3. Versuchsaufbau

Zur experimentellen Untersuchung wird die aktuelle Generation des TruMicro 2000 mit einer Wellenlänge von 1030 nm, *flexible Pulse on Demand*, maximaler Einzelpulsenenergie von 100  $\mu\text{J}$ , einstellbarer Pulsdauer zwischen 300 fs und 20 ps und einer maximalen mittleren Leistung von 20 W verwendet. Ein Galvo-Scannersystem excelliSCAN von SCANLAB kommt zum Einsatz mit einer f-Theta Fokussierlinse mit 100 mm Brennweite, daraus resultiert ein Spotdurchmesser von ca. 30  $\mu\text{m}$ . Es wird keine klassische Freistrahlführung mit Spiegeln, sondern eine industriereife Hohlkernfaser für ultrakurze Pulse hoher Energie vom Typ LLK-U genutzt [3].

Als Werkstoff dient Edelstahl 1.4301, auf dem mittels eines Volumenabtragsprozesses analog der vorgestellten Simulation quadratische Felder von 1 mm Seitenlänge bis zu einer Tiefe von 170  $\mu\text{m}$  ablatiert werden. Die verwendete Pulsdauer beträgt 300 fs, weitere Parameter sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die Fluenz wurde nahe dem Abtragseffizienz-Optimum gewählt [4].

Die Bearbeitungsqualität wird mit einem in den Prozess integrierten Off-axis Mikroskop analysiert. Nach jeder Überfahrt wird automatisiert eine Aufnahme der Oberfläche generiert.

### 4. Ergebnisse

Aus Simulationen werden zunächst Einflüsse auf die Prozesszeit der beschriebenen Applikation wie Scangeschwindigkeit, Regelungsstrategie des Scannersystems sowie Implementierung von Position Synchronized Output (PSO) analysiert. Mithilfe der Ergebnisse kann mit gleicher Hardware die bestmögliche Ausnutzung des Lasers realisiert werden. Ein entscheidendes Resultat ist, dass die Scangeschwindigkeit einen dominanten Einfluss hat und durch die passende Wahl dieses Parameters nicht produktive Nebenzeiten reduziert werden können (Abbildung 1).

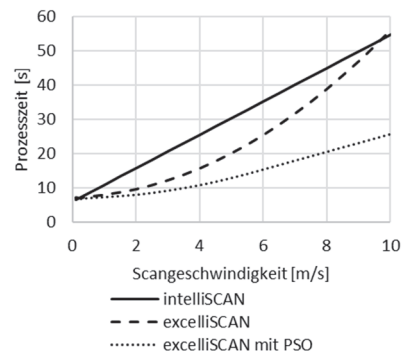


Abbildung 1: Simulierte Prozesszeit in Abhängigkeit der Scangeschwindigkeit und des Scannersystems für den untersuchten Bearbeitungsprozess.

Im Beispiel kann die Prozesszeit im gesamten untersuchten Scangeschwindigkeitsbereich (bei intelliSCAN mit 100 mm Brennweite wird bei einer Scangeschwindig-

keit von 10 m/s die maximale Achsgeschwindigkeit erreicht) durch die optimierte Regelungsstrategie des excelliSCAN im Verhältnis zu intelliSCAN reduziert werden. Die Reduktion ist vor allem von der Bearbeitungsvektorlänge (hier konstant) und der Scangeschwindigkeit abhängig. Die prozentuale Prozesszeitreduktion durch die Funktionalität PSO steigt mit zunehmender Scangeschwindigkeit (Abbildung 2).

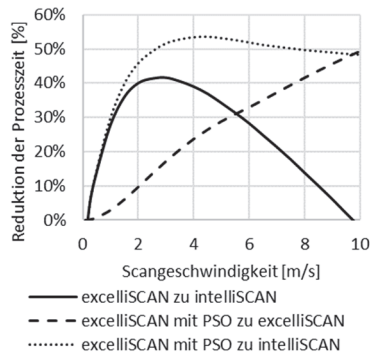


Abbildung 2: Vergleich der simulierten Prozesszeitreduktion in Abhängigkeit der Scangeschwindigkeit und des Scannersystems.

Die Nutzung der mittleren Laserleistung ist ein Maß für den effizienten Einsatz einer Strahlquelle im Bearbeitungsprozess. Durch die steigende mittlere Leistung der UKPL wird die minimal mögliche Scangeschwindigkeit im Bearbeitungsprozess aufgrund der Wärmeakkumulation steigen. Eine höhere Scangeschwindigkeit führt bei den untersuchten Galvo-Scansystemen jedoch zu einer niedrigeren Nutzung der mittleren Laserleistung, da nicht produktive Nebenzeiten zunehmen. Die Verwendung von PSO ermöglicht neben einem konstanten Spotabstand und Energieeintrag über den gesamten betrachteten Scangeschwindigkeitsbereich die höchste Nutzung der mittleren Laserleistung (Abbildung 3).

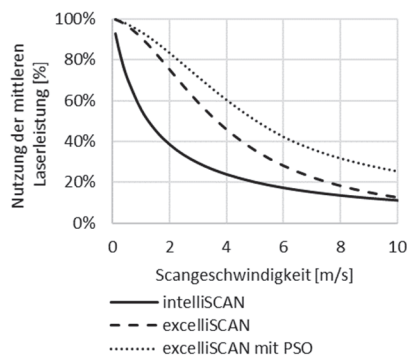


Abbildung 3: Nutzung der mittleren Laserleistung in Abhängigkeit der Scangeschwindigkeit und des Scannersystems.

Die Wärmeakkumulation im Prozess bestimmt die minimal mögliche Scangeschwindigkeit und somit die minimale Prozesszeit bei ausreichender Qualität. Die vorgestellten Simulationsergebnisse werden daher nachfolgend um Experimente ergänzt, um die Bearbeitungsqualität zu bewerten. Dazu wurde die Scangeschwindigkeit im Bereich von 1 m/s bis 8 m/s variiert. Nach jeder

Überfahrt wurde mittels einer Off-axis Mikroskopkamera automatisiert ein Bild der Oberfläche aufgenommen, ausgewählte Bilder sind für drei Scangeschwindigkeiten und zu vier Zeitpunkten in Tabelle 2 dargestellt. Die maximale Anzahl von Überfahrten beträgt für die drei gezeigten Scangeschwindigkeiten 60, 120 bzw. 360, so dass der Energieeintrag in allen drei Fällen gleich hoch ist. Bei einer niedrigen Scangeschwindigkeit (1 m/s) entstehen durch Wärmeakkumulation schon bei wenig Überfahrten thermisch induzierte Strukturen (sog. Cone-Like Protrusions, CLPs), die bei höherem Energieeintrag weiter zunehmen [5]. Bei einer Scangeschwindigkeit von 2 m/s werden solche Strukturen erst bei höherem Energieeintrag beobachtet, bei Scangeschwindigkeiten größer 2 m/s treten sie für die betrachtete Anwendung nicht auf. Die per Laserscanningmikroskop gemessene Abtragtiefe beträgt 164  $\mu\text{m}$  und stimmt damit näherungsweise mit der vorhergesagten (170  $\mu\text{m}$ ) überein.

Eine mögliche Strategie zur Vermeidung solcher Strukturen ist das thermische Management: Die eingebrachte Energie kann z.B. zeitlich oder räumlich verteilt werden oder es können längere Abkühlzeiten eingeplant werden. Mithilfe des Burstmodus des TruMicro 2000 können bei einer Scangeschwindigkeit von 1 m/s und der gleichen Anzahl an Überfahrten thermisch induzierte Strukturen vermieden werden. Selbst bei Erhöhung der mittleren Leistung auf 20 W sind noch keine Schädigungen zu beobachten und die ganze mittlere Leistung des UKPL kann in diesem Fall genutzt werden (Abbildung 4).

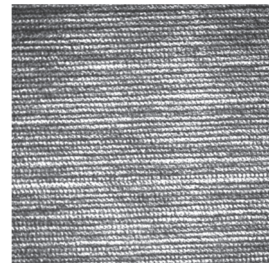


Abbildung 4: Bearbeitungsqualität auf Edelstahl bei einer Scangeschwindigkeit von 1 m/s, 60 Wiederholungen und 8-er Burst.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Anhand einer einfachen Simulation wurden für einen Abtragsprozess die Prozesszeiten in Abhängigkeit der Scangeschwindigkeit, des Scannersystems und der Funktionalität PSO berechnet. Die Verwendung des excelliSCAN reduziert die Prozesszeit im untersuchten Fall um 40%, bei Verwendung von PSO um über 50% im Vergleich zum Referenzscannersystem intelliSCAN. Eine möglichst niedrige Scangeschwindigkeit sollte gewählt werden, um nicht produktive Nebenzeiten zu reduzieren.

Ergänzend zu den Berechnungen wurden die Ergebnisse anhand einer realen Gravurapplikationen verifiziert und die erreichte Bearbeitungsqualität analysiert. Unterhalb einer kritischen Scangeschwindigkeit von in diesem Fall 2 m/s entstehen durch Wärmeakkumulationseffekte ungewollte thermische Strukturen. Diese Effekte können

selbst dann entstehen, wenn im Optimum der Abtrags-effizienz gearbeitet wird. Durch schnelleres Scannen kann die Bearbeitungsqualität erhöht werden, allerdings leidet dabei die Produktivität.

Für den konkret vorgestellten Fall und die gewählte Ziel-Abtragstiefe wird der beste Kompromiss aus Qualität und Produktivität bei einer Scangeschwindigkeit von ca. 3 m/s erreicht, allerdings sind hier viele weitere komplexe Abhängigkeiten aus zeitlicher und räumlicher Energieeinbringung zu berücksichtigen, auf die hier nicht weiter eingegangen werden kann.

Durch die Verwendung der vielfältigen Burst Funktionen des TruMicro 2000 kann selbst bei niedrigen Geschwindigkeiten eine Oberfläche von hoher Qualität erreicht werden und gleichzeitig höhere mittlere Leistungen genutzt werden. Die Flexibilität des Bearbeitungssystems erlaubt eine schnelle softwarebasierte Parameterumschaltung, die es ermöglicht, durch mehrstufige Prozesse beste Qualität mit gleichzeitig hoher Produktivität umzusetzen. Im nächsten Schritt werden Abtragsprozesse mit höheren mittleren Leistungen bis 300 W untersucht und Strategien entwickelt, diese Leistungen möglichst effizient umzusetzen.

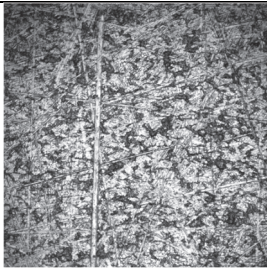
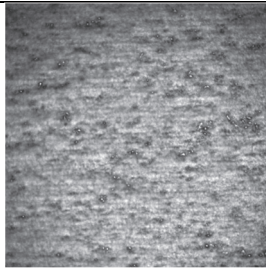
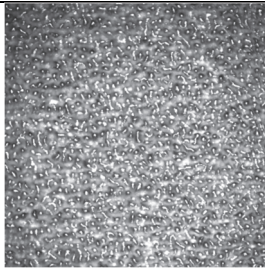
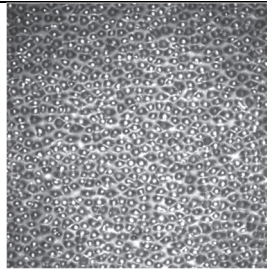
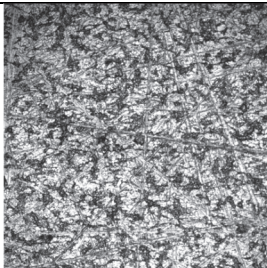


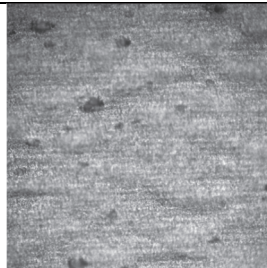
Da der Schlüssel zum Erfolg in der Betrachtung der kompletten Systemtechnik liegt, bietet TRUMPF ein Gesamtsystem aus einer Hand bestehend aus flexiblem UKPL

TruMicro 2000 mit *flexible Pulse on Demand*, Bearbeitungsstation TruLaser Station 7000 mit aktuellem Scannersystem, Strahlführung, Software, Startparametern und somit eine einfache Umsetzung für den Anwender.

### Literaturverzeichnis

- [1] M. Sailer et al., Micromachining flexibility by tunable ultrashort pulse duration, pulse-on-demand, and hybrid processing from single pulse to GHz burst with TruMicro Series 2000, SPIE Photonics West, 11267-29 (2020).
- [2] F. Nyenhuis, Dual Process Strategy to Increase the Usable Power for Laser-Milling, Journal of Laser Micro/Nanoengineering, Vol. 15, No. 3 (2020).
- [3] S. Baumbach et al., Hollow-core-fiber laser-light-cable on TruMicro Series 2000 for easy system integration, SPIE Photonics West, 11270-38 (2020).
- [4] A. Fehrenbacher et al., New generation TruMicro Series 2000: Micromachining versatility by GHz-burst, higher average power, flexible Pulse on Demand and integrated hollow-core fiber interface, SPIE Photonics West, 11674-26 (2021).
- [5] F. Bauer et al., Heat accumulation in ultra-short pulsed scanning laser ablation of metals, Optics Express 23(2), 1035-1043 (2015).

Tabelle 2: Erreichte Bearbeitungsqualitäten bei Volumenabtrag mit Einzelpulsen von Edelstahl in Abhängigkeit der Scangeschwindigkeit und des Energieeintrages (Anzahl Überfahrten).

$v_s$ m/s	Ausgangsoberfläche	Energieeintrag 7 J/mm <sup>2</sup>	Energieeintrag 14 J/mm <sup>2</sup>	Energieeintrag 42 J/mm <sup>2</sup>
1				
2				
6	