

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

D. Brinkmeier
Physical impediments and solutions
for laser materials processing

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf, Universität Stuttgart
Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW)

Das Strahlwerkzeug Laser gewinnt zunehmende Bedeutung für die industrielle Fertigung. Einhergehend mit seiner Akzeptanz und Verbreitung wachsen die Anforderungen bezüglich Effizienz und Qualität an die Geräte selbst wie auch an die Bearbeitungsprozesse. Gleichzeitig werden immer neue Anwendungsfelder erschlossen. In diesem Zusammenhang auftreten die wissenschaftliche und technische Problemstellungen können nur in partnerschaftlicher Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschungsinstituten bewältigt werden.

Das 1986 gegründete Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart (IFSW) beschäftigt sich unter verschiedenen Aspekten und in vielfältiger Form mit dem Laser als einem Werkzeug. Wesentliche Schwerpunkte bilden die Weiterentwicklung von Strahlquellen, optischen Elementen zur Strahlführung und Strahlformung, Komponenten zur Prozessdurchführung und die Optimierung der Bearbeitungsverfahren. Die Arbeiten umfassen den Bereich von physikalischen Grundlagen über anwendungsorientierte Aufgabenstellungen bis hin zu praxisnaher Auftragsforschung.

Die Buchreihe „Laser in der Materialbearbeitung – Forschungsberichte des IFSW“ soll einen in der Industrie wie in Forschungsinstituten tätigen Interessentenkreis über abgeschlossene Forschungsarbeiten, Themenschwerpunkte und Dissertationen informieren. Studenten soll die Möglichkeit der Wissensvertiefung gegeben werden.

Physical impediments and solutions for laser materials processing

von Dr.-Ing. David Brinkmeier
Universität Stuttgart



utzverlag München

Als Dissertation genehmigt
von der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Alois Herkommer

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

Bei Fragen zur Produktsicherheit wenden Sie sich bitte
an unsere Adresse: utzverlag GmbH ·
Herr Matthias Hoffmann · Nymphenburger Straße 91 ·
80636 München · Telefon: 0049-89-27779100 oder
www.utzverlag.de

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2026

D 93

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Sämtliche, auch auszugsweise Verwertungen bleiben vorbehalten.

Copyright © utzverlag GmbH 2026

ISBN (Print) 978-3-8316-5104-7
ISBN (E-Book) 978-3-8316-7845-7

Printed in Germany

utzverlag GmbH, München
Tel.: 089-277791-00 · www.utzverlag.de

Table of contents

Table of contents	5
Symbols and abbreviations	7
Kurzfassung in deutscher Sprache	13
Extended Abstract	16
1 Introduction	19
1.1 Challenges in laser materials processing	20
1.2 Obstacles in ultrafast laser drilling	27
1.3 Laser beam delivery for high-power ultrafast lasers.....	37
1.4 Impact of process emissions on laser beam and weld quality.....	48
2 Process limits for percussion drilling of stainless steel with ultrashort laser pulses at high average powers	62
3 Feasibility assessment of parallelized helical drilling	77
4 Influence of the laser-plume interaction on the beam profile during deep-penetration welding with coherent beam shaping	96
4.1 Supplement 1	110
5 Conclusion	111
References	115
Danksagung	177

Symbols and abbreviations

$A_{\perp}$	-	absorptivity of a material at normal incidence
C	-	sum of the (convergent) series
c_p	$\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	specific heat capacity at constant pressure
d	μm	diameter of the beam
d_{abl}	μm or mm	entry diameter of ablation crater or borehole
e	-	Euler's number
E_p	μJ or mJ	pulse energy
$E_{p,\text{th}}$	$\frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$	threshold pulse energy for breakdown in air for picosecond pulses at a laser wavelength of 1030 nm
f	mm	focal length
f_{rep}	kHz	pulse repetition rate
$f_{\text{rep,crit}}$	kHz	critical pulse repetition rate beyond which the critical temperature T_{crit} may be exceeded.
h_v	$\frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$	volume-specific process enthalpy for material ablation
I_0	-	Bessel function of the first kind of order zero
J_{inc}	$\frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$	incident or irradiated intensity
J_{th}	$\frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$	threshold intensity for breakdown in air

M^2	-	beam propagation factor
m	-	diffraction order
N_p	-	number of applied laser pulses
n	-	number of boreholes drilled sequentially
P	W	laser power
P_{avg}	W	average laser power
Q_{hole}	μJ or mJ	pulse energy irradiated into the borehole
R_{trepan}	μm	radius of the circular beam path in the focal plane
r	m	(radial) distance from the origin
r_{abl}	μm	ablation radius
T	K or $^{\circ}\text{C}$	temperature
T_0	K or $^{\circ}\text{C}$	ambient temperature
T_{crit}	K or $^{\circ}\text{C}$	critical temperature which should not be exceeded
$\dot{V}$	$\frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$	volume processed per unit time (volume ablation rate)
ΔV	mm^3	ablation volume
v_{feed}	m/s or m/min	feed rate
w	μm	radius of the beam
x	μm or mm	(scan) distance
χ_s	-	size parameter

z_{abl}	nm	ablation depth
z_{max}	μm or mm	maximum depth for percussion drilling with good quality using a laser beam with a Gaussian intensity profile
z	m	distance
α	$\frac{1}{\text{m}}$	(linear) absorption coefficient
α_{err}	$^{\circ}$ or rad	angle between two axes
α_{trepan}	$^{\circ}$ or rad	angle between the drilling axis and the axis of the (trepanning) beam, i.e. the half angle of the cone defined by the trepanning motion
α_{Ext}	$\frac{1}{\text{m}}$	extinction coefficient
α_{Sca}	$\frac{1}{\text{m}}$	attenuation coefficient for scattering at particles
α_{Abs}	$\frac{1}{\text{m}}$	absorption coefficient
β	rad	diffraction angle
δ_{eff}	nm	effective energy penetration depth
η_p	-	process efficiency
η_{res}	-	fraction of the pulse energy that remains in the material as residual heat
η_A	-	overall absorptance of the radiation inside the borehole or cavity
θ	rad	angular beam deflection or scan angle
$\Delta\theta$	rad	angular positioning accuracy

κ	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	thermal diffusivity
λ	nm	laser wavelength
ρ	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	mass per unit volume (density)
τ_p	ps or ns	pulse duration
ϕ	$\frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$	irradiated fluence
ϕ_0	$\frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$	irradiated peak fluence
$\phi_{0,\text{abs}}$	$\frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$	absorbed peak fluence on the beam axis at normal incidence
$\phi_{0,\text{opt}}$	$\frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$	optimum peak fluence with regard to energy-specific volume for a Gaussian intensity profile
ϕ_{opt}	$\frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$	optimum peak fluence with regard to energy-specific volume for a top-hat intensity profile
ϕ_{th}	$\frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$	material-specific ablation threshold fluence
$\phi_{\text{A,th}}$	$\frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$	material-specific ablation threshold for the absorbed fluence
ω	$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	angular velocity
AA6061-T6		aluminum alloy
A5083		aluminum alloy
AISI		American Iron and Steel Institute
AISI 304		steel alloy

AOD	acousto-optic deflector
Ar	argon
CBC	coherent beam combining
CO ₂	carbon dioxide
CrNi	chromium-nickel
cw	continuous-wave
DOE	diffractive optical element
EN AW-5754 (AlMg3)	aluminum alloy
EOD	electro-optic deflector
eUV	extreme ultraviolet
eV	electronvolt ($1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$)
fs	femtosecond
GHz	gigahertz
HAZ	heat-affected zone
He	helium
HeNe	helium-neon
K	Kelvin
MEMS	Micro-Electro-Mechanical-System
mm	millimeter
Mg	magnesium
MHz	megahertz

MTF	modulation transfer function
μm	micrometer
μs	microsecond
N_2	nitrogen
Nd:YAG	neodymium-doped yttrium aluminum garnet
nm	nanometer
ns	nanosecond
OPA	optical phased array
ps	picosecond
rad	radians
SLM	spatial light modulator
UV	ultraviolet

Kurzfassung in deutscher Sprache

Die zunehmende Verfügbarkeit kommerzieller Ultrakurzpulslaser mit Leistungen im Kilowattbereich birgt das Potenzial, die Produktivität bei der Lasermaterialbearbeitung für die Massenproduktion erheblich zu steigern. Neue Entwicklungen bei Dauerstrichlasern für die Materialbearbeitung, wie etwa die dynamische Strahlformung, bieten neue Freiheitsgrade, anhand derer zum Beispiel der Materialfluss in der Schmelze aktiv gesteuert werden könnte, was zu neuen Anwendungen führen könnte.

Die Fortschritte bei den Laserstrahlquellen für die Materialbearbeitung verschärfen jedoch auch die Herausforderungen, welche die effektiv einsetzbare Laserleistung und damit die Produktivität einzuschränken vermögen. Solche Herausforderungen sind Effekte wie Wärmeakkumulation, Abschirmung und Streuung der einfallenden Laserstrahlung durch verdampfte, ablatierte und kondensierte Partikel, und atmosphärischer Durchbruch („Luftplasma“). Eine übermäßige Wärmeakkumulation bei der Materialbearbeitung mit Ultrakurzpulslasern kann zu einer schlechten Oberflächenqualität führen, weshalb die eingestrahlte mittlere Laserleistung begrenzt werden muss. Die Wechselwirkung zwischen dem einfallenden Laserstrahl und Prozessemissionen wie Metaldämpfen, Partikeln und Plasmen kann die Eigenschaften des Laserstrahls, der das Werkstück erreicht, in unerwünschter Weise verändern. Da diese Wechselwirkung stochastischer Natur ist, führt sie auch zu Unregelmäßigkeiten im Endprodukt, z. B. in der Schweißnahttiefe und -geometrie.

Um das Potenzial immer leistungsfähigerer und flexiblerer Laserstrahlquellen voll auszuschöpfen, müssen die prozessspezifischen physikalischen Grenzen identifiziert werden. Auf dieser Basis können Anforderungen an die Systemtechnik zur Führung des Laserstrahls spezifiziert und umgesetzt werden. Ein wichtiger Aspekt ist dabei, Rahmenbedingungen zu schaffen, welche verhindern, dass der Laserstrahl durch Einflüsse wie Aberrationen im optischen System oder heiße Prozessdämpfe beeinträchtigt wird. So wird sichergestellt, dass der Strahl das Werkstück wie vorgesehen erreicht. Vor diesem Hintergrund wurden Aspekte dieser miteinander verflochtenen

Themenbereiche untersucht. Die Vorgehensweise und die Ergebnisse sind in der vorliegenden Arbeit wiedergegeben.

Es ist bekannt, dass ein übermäßiger Wärmeeintrag bei der Materialbearbeitung mit Ultrakurzpulslasern zu einer verminderten Oberflächenqualität führen kann. Ein vereinfachtes thermisches Modell wurde experimentell validiert (Kap. 2), um den kritischen Schwellenwert für die Wärmeakkumulation beim Perkussionsbohren von Edelstahl vom Typ AISI 304 vorherzusagen. Unter Berücksichtigung zusätzlicher einschränkender Effekte wie der Abschirmung der einfallenden Laserstrahlung durch Partikel und Atmosphärendurchbruch sowie einer Abschätzung der erreichbaren Bohrlochtiefe ermöglicht das Modell die Erstellung von Prozesskarten, die Kriterien für die Auswahl geeigneter Prozessparameter und Lasersysteme liefern. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, dass eine Parallelisierung des Bearbeitungsprozesses unerlässlich ist, um das Potenzial von Ultrakurzpulslasern mit Ausgangsleistungen im Kilowattbereich voll auszuschöpfen. Durch die Verteilung der Laserenergie simultan oder sequentiell auf mehrere gleichzeitige Bearbeitungspositionen wird der Wärmestau an jeder einzelnen Position minimiert.

Die sequentielle Parallelisierung durch Reduzierung der Pulsfrequenz je Bohrloch bei gleichzeitiger Beibehaltung hoher Laserleistung ist eine effektive Strategie für das gepulste Bohren. Bei diesem Ansatz bleibt die volle Pulsenergie für jedes Bohrloch verfügbar, wodurch die maximale Bohrtiefe erreicht werden kann, im Gegensatz zur simultanen Parallelisierung durch Strahlaufteilung, bei der die Pulsenergie auf mehrere Strahlen aufgeteilt wird und die erreichbare Tiefe reduziert ist. Bei der sequentiellen Methode werden aufeinanderfolgende Laserpulse mithilfe eines schnellen Strahlablenksystems auf verschiedene Positionen, z. B. benachbarte Bohrlöcher, gelenkt. Die Umsetzung ist jedoch mit bestehenden Strahlablenktechnologien herausfordernd, da diese oft nicht in der Lage sind, hohe Laserleistungen zu bewältigen, oder die Position des Laserstrahls auf dem Werkstück nicht schnell genug ändern können, um einzelne Pulse bei Pulsrepetitionsraten im MHz-Bereich präzise an die gewünschte Stelle zu leiten.

Die Parallelisierung des Bearbeitungsprozesses stellt insbesondere bei komplexeren Bohrtechniken wie dem Wendelbohren eine zusätzliche Herausforderung dar. Das Wendelbohrverfahren wird in Anwendungen eingesetzt, die eine speziell geformte Bohrlochgeometrie, hohe Oberflächenqualität, enge Toleranzen und eine hohe Reproduzierbarkeit erfordern.

Anhand eines experimentellen Konzeptnachweises (Kap. 3) konnte gezeigt werden, dass die Integration eines Strahlablenkungssystems vor der Wendelbohroptik die parallele Bearbeitung mehrerer Bohrungen ermöglicht und dabei nahezu identische Bearbeitungsparameter und vernachlässigbare Aberrationen über das realisierbare Scanfeld gewährleistet. Diese Anordnung kann verwendet werden, um die Puls-wiederholrate pro Bohrlochposition bei konstanter Laserleistung zu reduzieren. Somit stellt diese Lösung einen gangbaren Weg zur Steigerung der Produktivität von Wendelbohrprozessen mit hochleistungsfähigen Ultrakurzpulslasern dar.

Ein weiterer kritischer Aspekt ist die Wechselwirkung zwischen dem einfallenden Laserstrahl und den Prozessemissionen wie Rauch und Dampf, welcher beispielsweise beim Laser-Tiefschweißen entsteht. Der Einfluss dieser Störfaktoren auf den Laserstrahl ist beim Tiefschweißen mit konventionellen Single- und Multimode-Lasern zwar hinreichend bekannt, jedoch nicht bei der Verwendung komplexerer Strahlformen, wie sie neuerdings durch die dynamische Strahlformung kohärent überlagerter Laserarrays möglich sind. Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher erstmals der Einfluss des Prozessdampfes auf komplexe Strahlformen beim Tiefschweißen untersucht (Kap. 4). Hierzu kam ein speziell entwickeltes Hochleistungs-Laserstrahlvermessungssystem zum Einsatz, welches den Hochleistungslaserstrahl erfasst, der die Prozessemissionen durchläuft.

Es wurde festgestellt, dass die Wechselwirkungen des Laserstrahls mit Prozessrauch und -dampf zu Positionsinstabilitäten des Strahlprofils in der Werkstückebene sowie zu Verzerrungen des Strahlprofils führen. Solche Effekte wirken sich nachweislich negativ auf die Reproduzierbarkeit von Prozessergebnissen wie Schweißnahttiefe und -geometrie aus. Es wurden Positionsinstabilitäten im Bereich von einigen Dutzend Mikrometern und Verzerrungen der Strahlform beobachtet. Die Implementierung eines Crossjets zur Entfernung des Prozessrauches aus dem Strahlweg reduzierte sowohl die Positionsinstabilität als auch die Verzerrungen des Strahlintensitätsprofils in der Werkstückebene erheblich. Die besten Ergebnisse wurden erzielt, wenn der Crossjet möglichst nahe an der Bearbeitungszone angeordnet war. Die Ergebnisse unterstreichen, wie wichtig es ist, prozessbedingte Störungen effektiv zu beseitigen, um die Integrität des Laserstrahls und damit gleichbleibende Bearbeitungsergebnisse zu gewährleisten.

Extended Abstract

The increasing availability of commercial ultrafast lasers with average powers in the kilowatt range represents an important development for laser materials processing. This progress has the potential to enable productivity levels suitable for large-scale production. New developments in continuous-wave lasers for materials processing, such as dynamic beam shaping, offer new degrees of freedom that might be used to actively control the material flow in the melt, which could open up new applications.

However, advances in lasers for materials processing also exacerbate the challenges that can limit the effectively usable laser power and thus productivity. Such challenges include effects such as heat accumulation, attenuation and scattering of the incident laser radiation by vaporized, ablated and condensed particles as well as plasma effects such as atmospheric breakdown. Excessive heat accumulation during materials processing with ultrafast lasers can lead to poor surface quality, which is why the applied average laser power must be limited. The interaction between the incoming laser beam and process emissions, such as metal vapors, particles, and plasmas, can undesirably alter the properties of the laser beam reaching the sample. As this interaction is of a stochastic nature, it also leads to irregularities in the end product such as the weld seam depth and geometry.

To fully leverage the potential of increasingly powerful and flexible lasers, process-specific physical limitations must be identified. Based on this understanding, requirements for the laser beam delivery system can be specified and implemented. An important aspect is to establish conditions that prevent the laser beam from being affected by factors such as aberrations in the optical system or hot process fumes. This ensures that the beam reaches the workpiece as intended. For these reasons, aspects of these interconnected areas of research were investigated and reported on in this thesis.

It is known that excessive heat input during materials processing with ultrafast lasers can lead to a reduced surface quality. A simplified thermal model was experimentally validated (Chapter 2) to predict the critical threshold for heat accumulation during percussion drilling of stainless steel of type AISI 304. Together with the consideration of additional limiting effects, such as shielding of the incident laser radiation by particles and atmospheric breakdown, as well as an estimation of the achievable drilling depth, the model enables the creation of process maps that provide criteria for selecting suitable process parameters and laser systems. The results of these investigations indicate that parallelization of the processing is essential to fully exploit the potential of ultrafast lasers with kilowatt-level output power. By distributing the laser energy simultaneously or sequentially across multiple processing positions, heat accumulation at each individual position is minimized.

Sequential parallelization to reduce the pulse repetition rate at each hole while still applying the full available laser power is an effective strategy for pulsed drilling. With this approach, the full pulse energy remains available for each hole, allowing maximum hole depth to be achieved, as opposed to simultaneous parallelization by beam splitting, which splits the pulse energy across multiple beams and limits the achievable depth. In the sequential parallelization approach, successive laser pulses are directed to different positions, e.g. neighboring holes, using a fast beam deflection system. However, implementation is challenging with existing beam steering technology, as many devices are unable to handle high laser powers or change positions fast enough so as to direct individual pulses to different positions at repetition rates in the MHz range.

Parallelizing the machining process presents an additional challenge, especially for more complex drilling techniques such as helical drilling. The helical drilling method is used in applications that require a specifically shaped borehole geometry, high surface quality, tight tolerances, and high reproducibility.

Using an experimental proof-of-concept (Chapter 3) it was demonstrated that integrating a beam steering device before the helical drilling optics allows for the parallel processing of multiple boreholes while ensuring nearly identical processing parameters and negligible aberrations across the scan field. This arrangement can be used to effectively reduce the pulse repetition rate per borehole and aligns with the capabilities of existing devices. The solution presented thus demonstrates a viable way to increase the productivity of helical drilling with high-power ultrafast lasers.

Another critical aspect is the interaction between the incident laser beam and process emissions, such as smoke and vapor, which are generated, for example, during deep-penetration laser welding. While the influence of these effects on the laser beam is sufficiently well understood in welding with conventional single- and multi-mode lasers, it remains largely unexplored for more complex beam shapes, as recently enabled by dynamic beam shaping using coherently combined laser arrays. In the present work, the influence of process fumes on complex beam shapes in deep-penetration welding was therefore investigated for the first time (Chapter 4). A specially developed high-power beam measurement system was used to capture the impact on the profile of the processing laser beam after it traversed the process emissions.

It was found that interactions between the laser beam and the process plume lead to positional instabilities of the beam on the workpiece, as well as to distortions of the beam profile. Such effects are known to negatively impact the reproducibility of process results, such as weld depth and seam geometry. Positional instabilities in the range of several dozen micrometers and distortions of the beam shape were observed. The implementation of a cross-jet to remove the process plume from the beam path significantly reduced both the positional instability and the distortions of the beam's intensity profile. The best results were achieved when the cross-jet was positioned as close as possible to the processing zone. These findings emphasize the importance of effectively managing process-related disturbances to ensure the integrity of the laser beam and consistent processing results.

1 Introduction

A useful property of lasers, particularly in the context of materials processing applications, is the ability to deposit energy with high temporal and spatial precision. In most applications of lasers in materials processing, the energy introduced by the laser beam per unit of time and volume acts as a heat source and is used to modify, melt, vaporize or ablate material. The physical effects that govern the interactions between laser beam and matter largely depend on the time scale and irradiance¹ with which the energy is received. The duration of the laser-matter interaction ranges from seconds for hardening to femtoseconds for ablation processes at laser intensities ranging from 10^2 to 10^{14} W/cm² ([1] p. 6).

Despite such significant differences in interaction time and laser intensity across various laser materials processing applications, they all share a common goal: to enhance productivity and precision, while minimizing defects in the final product. This is accomplished by selecting an appropriate laser, optimizing the parameters of exposure for the specific process and material, and precisely delivering the laser energy using suitable beam guiding technologies. Additionally, shielding gases or even vacuum is often employed in the processing zone to further enhance results.

Heat management in both the sample and the optical system, as well as the precise guiding of the laser beam, are the primary physical and technical challenges in laser materials processing. These challenges represent the impediments to laser materials processing, and addressing them is the key to developing manufacturing solutions suitable for industrial production. Research in laser materials processing aims to expand knowledge and develop economical, feasible and robust solutions. Understanding and controlling laser-matter interactions is a prerequisite to achieving these goals.

¹ According to SI standards (IEV ref 845-21-053) irradiance is the density of incident radiant flux with respect to area at a point on a surface in units of W/m². Intensity is the power per unit area when light is transmitted through a flat surface perpendicular to the direction of radiation.

Section 1.1 provides an overview of the primary challenges in laser materials processing, their interdependencies, and their role in advancing the field, offering a broad perspective rather than an exhaustive analysis. The section concludes by identifying current areas of interest that emerge within the discussed research areas. Sections 1.2, 1.3, and 1.4 examine the state of research in these areas in detail, leading to the identification of unresolved scientific questions. The publications presented in Chapter 2, 3, and 4 contribute to filling the identified knowledge gaps by providing insights into aspects within these areas of research.

1.1 Challenges in laser materials processing

In laser materials processing, the laser is used as a tool to transfer energy to the material with control over both the timing and location of the energy deposition. The targeted supply of energy (and material) can be used to change material properties (e.g. hardening, coating), change the shape of a part by laser forming, separate material by laser cutting, join material by laser welding or soldering, remove material by vaporization or ablation and create structures from powder or wire by melting. The properties of the laser beam and the absorption of the energy by the material determine the heat source, which plays a decisive role in the thermal processes in the workpiece. These thermal processes directly impact the final properties of the component. The types of defects that can occur vary depending on the application and process, as do the strategies used to correct them.

For instance, excessive heating of the workpiece during laser cutting can lead to fluctuations in the kerf geometry [2, 3] and even lead to cutting losses. By using dwell times and path optimization to avoid local overheating, instabilities in the cutting process can be avoided [4]. In laser welding, residual stresses and deformations can remain in the workpiece as a result of the rapid thermal expansion and shrinkage. These residual stresses can lead to material separation after the process [5] (cold cracking), which can be alleviated by heat treatment techniques during and after the process. Hot cracking or grain boundary cracking can occur during solidification of the melt when thermal stresses separate the partially solidified material [6]. Metallurgical transformations of the grain structure in the weld seam [7, 8] and