

Helge Kügler

Einfluss mehrfacher
Wärmeeinwirkung
auf die Änderung
der Laserstrahl-
absorption einer
Stahloberfläche



Kügler, Helge – Einfluss mehrfacher Wärmeeinwirkung auf die Änderung der Laserstrahlabsorption einer Stahloberfläche

Strahltechnik Band 77, BIAS Verlag, 2023.

Herausgeber der Reihe: R. Bergmann

ISBN 978-3-933762-71-9

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, bleiben vorbehalten.

Kein Teil des Werks darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlags in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder andere Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG ausdrücklich genannten Sonderfällen – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

BIAS Verlag, Bremen, 2023

Einfluss mehrfacher Wärmeeinwirkung auf die Änderung der Laserstrahlabsorption
einer Stahloberfläche

Vom Fachbereich Produktionstechnik
der
UNIVERSITÄT BREMEN

zur Erlangung des Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation
von
M. Sc. Helge Kügler

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Frank Vollertsen

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Jean Pierre Bergmann (TU Ilmenau)

Tag der mündlichen Prüfung: 28.08.2023

Kügler, Helge

Einfluss mehrfacher Wärmeeinwirkung auf die Änderung der Laserstrahlabsorption einer Stahloberfläche

Strahltechnik, Bd. 77, Bremen; BIAS Verlag, 2023. Hrsg.: R. Bergmann
Zugl.: Bremen, Univ., Diss., 2023.
ISBN 978-3-933762-71-9

Schlüsselwörter: Absorptionsmessung, Rauheit, Temperaturregelung, Oxidation, thermisches Biegen

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den Auswirkungen verschiedener Zeit-Temperatur-Verläufe bei der Laserstrahlerwärmung auf Temperaturen unterhalb des Schmelzpunkts auf die Absorption einer nichtrostenden Stahloberfläche. Es wird der Einfluss der Ausgangsoberfläche untersucht, indem verschiedene mechanische und thermische Oberflächenvorbehandlungen angewendet werden. Der Fokus der Arbeit liegt darin, eine Vorhersagbarkeit der Absorptionsänderung unabhängig von der Ausgangsoberfläche zu ermöglichen. Die in dieser Arbeit präsentierte Vorhersagemethode verwendet die Ausgangsabsorption und einen charakteristischen Oberflächenkennwert, um den Verlauf der Absorptionsänderung infolge einer Temperatureinwirkung vorherzusagen. Es wird zudem gezeigt, dass der Temperaturverlauf dabei sowohl gemessen als auch das Ergebnis einer Simulation sein kann. Bei der Übertragung der Erkenntnis auf eine numerische Simulation wird das hohe Anwendungspotential demonstriert.

Influence of multiple heating on the modification of the laser beam absorption of a steel surface

Keywords: Absorption measurement, roughness, temperature control, oxidation, thermal bending

The work deals with the effects of different time-temperature histories of laser beam heating at temperatures below the melting point on the absorption of a stainless steel surface. The influence of the initial surface is investigated by applying various mechanical and thermal surface pretreatments. The focus of the work is to provide predictability of the absorption change independent of the initial surface.

The prediction method presented in this paper uses the initial absorption and a characteristic surface parameter to predict the variation of the absorption change due to a temperature exposure. It is also shown that the temperature profile can be both measured and the result of a simulation. When transferring the findings to a numerical simulation, the high application potential is demonstrated.

Danksagung

Diese Arbeit entstand während und nach meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Gruppenleiter am BIAS – Bremer Institut für angewandte Strahltechnik.

Meinen besonderen Dank möchte ich meinem Betreuer der Doktorarbeit und Institutsleiter Prof. Dr.-Ing. Vollertsen aussprechen. Die Einstellung als wissenschaftlicher Mitarbeiter und das entgegengebrachte Vertrauen waren die Grundsteine dieser Dissertation. Die hervorragenden Arbeitsbedingungen am BIAS und die konstruktiven Diskussionen haben die Umsetzung dieser Arbeit erst ermöglicht. Für die ehrliche Zusammenarbeit bin ich äußerst dankbar.

Für die Übernahme des Koreferates gilt mein herzlicher Dank Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Jean Pierre Bergmann (Technische Universität Ilmenau), Frau Professor Dr.-Ing. Maren Petersen (Universität Bremen), Herrn Jun.-Prof. Dr.-Ing. Peer Woizeschke (Technische Universität Dortmund) sowie den Herren Marcel Möbus (Universität Bremen) und Marius Möller (Universität Bremen) danke ich für die Mitarbeit im Prüfungsausschuss des Promotionskolloquiums.

Darüber hinaus möchte ich mich bei allen ehemaligen Kolleg:innen am BIAS und studentischen Hilfskräften für die Zusammenarbeit und die Unterstützung bei der Durchführung und Auswertung der Experimente bedanken. Die angenehme und produktive Atmosphäre war ein wichtiger Bestandteil, damit die Ergebnisse entstehen konnten, die dieser Arbeit zugrunde liegen.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) danke ich für die Förderung des zugrunde liegenden Forschungsprojektes, in dem die wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeit entstanden sind.

Danken möchte ich zudem Frau Eva-Maria Meyer (IMSAS) und dem Institut für Mikrosensoren, -aktoren und -systeme (IMSAS) der Universität Bremen für die Unterstützung mit den FIB-Schnitten und den zugehörigen Aufnahmen.

Meiner wunderbaren Familie möchte ich für die fortwährende Unterstützung danken, die mir erst ermöglicht hat, diesen Weg zu gehen.

Meiner Frau Wiebke möchte ich danken für das Zuhören, die Geduld, das Motivieren und für das Durchhaltevermögen. Ohne diese Unterstützung wäre diese Arbeit nie fertig geworden.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnisse verwendeter Abkürzungen und Formelzeichen	V
Abkürzungen	V
Formelzeichen	VI
1 Einleitung	1
2 Stand der Forschung	3
2.1 Anwendungen mehrfacher Laserbestrahlungen	3
2.1.1 Formgebung durch Laserbestrahlung	3
2.1.2 Formgebende Prozesse mit unterstützender Laserbestrahlung.....	9
2.1.3 Modellierung formgebender Laserstrahlprozesse	11
2.1.3.1 Analytische Modelle für formgebende Laserstrahlprozesse	11
2.1.3.2 Numerische Simulation formgebender Laserstrahlprozesse	13
2.2 Absorption von Laserstrahlung	15
2.2.1 Grundlagen	15
2.2.2 Messmethoden	17
2.2.3 Temperatureinfluss	19
2.2.4 Topografieeinfluss	20
2.3 Oxidation nichtrostender Stähle	23
2.3.1 Oxidschichtbildung.....	23
2.3.2 Absorptionsveränderungen durch Oxidation.....	29
2.4 Fazit	32
3 Zielsetzung.....	33
4 Materialien und Methoden.....	35
4.1 Werkstoffe	35
4.2 Versuchsdurchführung	36
4.2.1 Punktuelle temperaturgeregelte Werkstofferwärmung.....	36
4.2.2 Lineare Werkstofferwärmung durch Laserbestrahlung.....	38
4.2.3 Verwendung linearer Werkstofferwärmung für einen Biegeprozess	40
4.2.4 Flächige Werkstückerwärmung durch Erwärmung in einem Ofen.....	41

4.2.5	Oberflächenmodifikation durch plastische Verformung	41
4.3	Probenvorbehandlung.....	42
4.4	Analysen.....	44
4.4.1	Beschreibung der Bestrahlungsintensität durch die temperaturkompensierte Zeit.....	44
4.4.2	Bestimmung der Rauheits- und Oberflächenkennwerte.....	47
4.4.3	Absorptionsmessung.....	48
4.4.4	Verformungsmessung.....	49
4.4.5	Oxidschichtmessung.....	50
4.5	Numerische Simulation eines Biegeprozesses	50
5	Ergebnisse	53
5.1	Schutzgaseinfluss	53
5.2	Auswirkungen linearer Laserbestrahlung.....	53
5.2.1	Makroskopische Veränderungen	53
5.2.2	Rauheitsänderungen infolge einer linearen Laserbestrahlung.....	54
5.2.3	Absorptionsänderungen infolge einer linearen Laserbestrahlung	57
5.3	Auswirkungen einer flächigen Werkstückerwärmung.....	59
5.3.1	Rauheitsänderungen infolge flächiger Werkstückerwärmung	59
5.3.2	Absorptionsänderungen infolge flächiger Werkstückerwärmung.....	60
5.4	Auswirkungen temperatur geregelter Punktbestrahlungen	61
5.4.1	Einfluss der initialen Oberflächenbeschaffenheit.....	61
5.4.2	Rauheitsänderungen infolge temperatur geregelter Punktbestrahlung.....	62
5.4.3	Mikrostrukturelle Veränderungen	64
5.4.4	Absorptionsänderungen infolge temperatur geregelter Punktbestrahlung ...	66
5.5	Auswirkung plastischer Verformung	68
5.6	Nutzung linearer Laserbestrahlung für einen Biegeprozess.....	69
6	Einflussfaktoren auf die Absorptionsänderung	71
7	Vorhersagbarkeit der Absorptionsänderung	77

8 Nutzen prozessabhängiger Absorptionsgrade für numerische Simulationen.....	89
9 Zusammenfassung.....	95
10 Literaturverzeichnis.....	97
Veröffentlichungsliste	109
Reihe Strahltechnik im BIAS Verlag	115

Verzeichnisse verwendeter Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
AA	Aluminiumlegierung (engl. aluminium alloy)
AISI	Stahlsortenbezeichnung des nordamerikanischen Branchenverbands der Stahlindustrie (engl.: American Iron and Steel Institute)
AW	Aluminiumknetlegierungen (engl. aluminium wrought alloy)
BaSO ₄	Bariumsulfat
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
Cr ₂ O ₃	Chrom(III)-oxid
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
FE	Finite Elemente; numerisches Simulationsverfahren
Fe ²⁺ Cr ₂ O ₄	Chromit, ein chromhaltiger Spinell
Fe ₂ O ₃	Eisen(III)-oxid
FIB	Fokussierter Ionenstrahl (engl.: focused ion beam)
HCl	Chlorwasserstoff, auch Salzsäure
HLFC	Konzept zur aktiven Grenzschichtabsaugung an Trag- und Leitwerksflächen von Flugzeugen (engl. Hybrid Laminar Flow Control)
HNO ₃	Salpetersäure
ISO	Internationale Organisation für Normung (engl. International Organization for Standardization)
K	Körnung
MnO ₂	Mangan(IV)-oxid
Nd:YAG	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat
Ni ₇₀ Cr ₃₀	Nickel-Chrom-Legierung
Oberfl.	Oberfläche(n)
PID-Regler	Proportional-Integral-Differenzialregler (engl. proportional-integral-derivative controller)
SEM	Sekundärelektronenmikroskopie
SiO	Siliciummonoxid
SS304	Nichtrostender Stahl der Sorte 304 nach AISI (engl. stainless steel)

Abkürzung	Beschreibung
STEM	Rastertransmissionselektronenmikroskop (engl. Scanning Transmission Electron Microscope)
Temp.	Temperatur
X5CrNi18-10	nichtrostende Stahlsorte
Yb:YAG	Ytterbium-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat

Formelzeichen

Die Einheit der Formelzeichen wird stets in SI-Einheiten oder daraus abgeleiteten Größen angegeben und berücksichtigt nicht die übliche Größenordnung.

Symbol	Einheit	Beschreibung
ΔA_{ges}		Summe der experimentellen Absorptionsänderung und der initialen Absorptionsdifferenz
ΔA_{vor}		initialen Absorptionsdifferenz zur Bezugsvorbehandlung
ΔA		Absorptionsänderung
A		Absorption
A_0		Absorption im Ausgangszustand
A_0^*		initiale Absorption der Bezugsvorbehandlung
$A_{1,calc}$		berechnete Absorption im bearbeiteten Zustand
A_1		Absorption im bearbeiteten Zustand
A_p		Absorption bei paralleler Polarisierung
A_s		Absorption bei senkrechter Polarisierung
D_0	m ² /s	Vorfaktor des Diffusionskoeffizienten
D_{eff}	m ² /s	effektiver Diffusionskoeffizient
$F_{Messfeld}$	m ²	Fläche des Mikroskopmessbereichs
$F_{Oberfläche}$	m ²	Oberfläche der Probe im Mikroskopmessbereich
NA	mol	Avogadro-Konstante ($6.022 \cdot 10^{23} \frac{1}{mol}$)
P	W	Laserstrahlleistung
Q	J	Aktivierungsenergie
Q_{eff}	J mol ⁻¹	effektive Aktivierungsenergie
R^2		Bestimmtheitsmaß
Ra	m	arithmetischer Mittenrauwert
Rq	m	quadratischer Mittenrauwert

Symbol	Einheit	Beschreibung
Rz	m	gemittelte Rautiefe
Sa	m	arithmetische mittlere Höhe der Oberfläche
Sdq	m	quadratischer Neigungsmittelwert der Oberfläche
Sq	m	quadratische mittlere Höhe der Oberfläche
Sz	m	maximale Höhe der Oberfläche
S_{top}		Topografiefaktor Oberfläche / Messfeldfläche
T	K	Temperatur
a		Koeffizient (Vorfaktor) der Potenzfunktion zur Beschreibung der Absorptionssteigerung in Abhängigkeit der temperaturkompensierten Zeit
a^*		Koeffizient (Vorfaktor) der Potenzfunktion zur Beschreibung der Absorptionssteigerung in Abhängigkeit der temperaturkompensierten Zeit bezogen auf die Bezugsvorbehandlung
b		Koeffizient (Exponent) der Potenzfunktion zur Beschreibung der Absorptionssteigerung in Abhängigkeit der temperaturkompensierten Zeit
b^*		Koeffizient (Exponent) der Potenzfunktion zur Beschreibung der Absorptionssteigerung in Abhängigkeit der temperaturkompensierten Zeit bezogen auf die Bezugsvorbehandlung
c_p	$J kg^{-1} K^{-1}$	spezifische Wärmekapazität
k_B	$J K^{-1}$	Boltzmannkonstante ($1.38064852 * 10^{-23} \frac{J}{K}$)
k_P	$kg^2 m^{-4} s^{-1}$	parabolische Oxidationskonstante
n		Anzahl der Bestrahlungszyklen
n_1		Realteil des Brechungsindex
n_2		Imaginärteil des Brechungsindex
s	m	Werkstückdicke
t_K	m^2	temperaturkompensierte Zeit
$t_{K,exp}$	m^2	im Experiment gemessene temperaturkompensierte Zeit
$t_{K,ges}$	m^2	gesamte temperaturkompensierte Zeit
$t_{K,vor}$	m^2	äquivalente temperaturkompensierte Zeit der Bezugsvorbehandlung zur Erreichung der Ausgangsabsorption
t_K^*	m^2	äquivalente temperaturkompensierte Zeit zur Erreichung der Absorptionssteigerung ΔA bei der Bezugsvorbehandlung

Symbol	Einheit	Beschreibung
t_K^{**}	m ²	Kompensationswert der temperaturkompensierten Zeit
t_W	s	Wirkdauer
v	m/s	Prozessgeschwindigkeit
x	m	Diffusionseindringtiefe
α_B		Biegewinkel
α_{th}	K ⁻¹	thermischer Ausdehnungskoeffizient
ϑ		Einfallswinkel
λ	m	Wellenlänge
ρ	kg/m ³	Dichte
\varnothing	m	Durchmesser

1 Einleitung

Der Trend zu mehr kundenindividuellen Produkten und damit sinkenden Losgrößen führt zu dem Wunsch nach flexibleren Produktionseinheiten in der industriellen Fertigung. Zunehmender Kostendruck ist ein weiterer Treiber dieser Entwicklung. Die Auswirkungen auf die industrielle Produktion sind unter anderem in dem Aufkommen von Remote-Technologien in der Lasermaterialbearbeitung zu sehen.

Der Laserstrahl kann aufgrund der realisierbaren Prozessvielfalt als universelles Werkzeug angesehen werden. Neben den weit verbreiteten Schneid- und Schweißprozessen in der Metallbearbeitung kann der Laserstrahl ebenfalls für oberflächige Behandlungen wie dem Härten oder thermischen Biegen verwendet werden. Auch als unterstützende Wärmequelle kann der Laserstrahl beispielsweise beim Scherschneiden oder inkrementellen Umformen genutzt werden.

Bei Prozessen wie dem thermischen Biegen wird die Oberfläche mehrfach bestrahlt. Die Auswirkungen der erzeugten Temperaturzyklen können in numerischen Simulationen nachgestellt werden. Maßgeblich für die Berechnung der eingetragenen Energie und somit auch für die Genauigkeit des Simulationsergebnisses ist dabei die Kenntnis des Absorptionsgrads einer Oberfläche. Bislang wird jedoch die Absorption in Simulationen häufig als freier Fittingfaktor verwendet, um das Simulationsergebnis einem experimentellen Versuch anzugleichen. Den durch die Oberflächenbeschaffenheit und vorherige Temperatureinwirkungen beeinflussten Absorptionsgrad während einer Simulation einer Mehrfachbestrahlung anzupassen, hat daher das Potential, die Genauigkeit der Simulation zu steigern.

In dieser Arbeit werden die Auswirkungen verschiedener Zeit-Temperatur-Verläufe bei der Laserstrahlerwärmung auf Temperaturen unterhalb des Schmelzpunkts auf die Absorption einer nichtrostenden Stahloberfläche untersucht. Zudem wird der Einfluss der Ausgangsoberfläche untersucht.

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt darin, eine Möglichkeit zu finden, die Einflussfaktoren der Absorptionsänderung durch kurzzeitige Erwärmung unabhängig von der Ausgangsoberfläche zu beschreiben und deren Vorhersagbarkeit zu ermöglichen, um diese Erkenntnis für numerische Simulationen nutzen zu können.

2 Stand der Forschung

2.1 Anwendungen mehrfacher Laserbestrahlungen

2.1.1 Formgebung durch Laserbestrahlung

Laserstrahlung kann für verschiedene Anwendungen eingesetzt werden. Neben den weit verbreiteten Verfahren Schweißen und Schneiden, kann der Laserstrahl auch für Prozesse unterhalb der Schmelztemperatur des Werkstücks eingesetzt werden. Das berührungslose Laserstrahlumformen ist ein solcher Prozess.

Geiger und Vollertsen definierten die Mechanismen des Laserstrahlbiegens [1]. Sie beschrieben das Laserstrahlumformen als Umformen durch thermische Spannungen, die durch Bestrahlungen mit dem Laserstrahl induziert werden. Drei Mechanismen des Laserstrahlumformens wurden von Arnet und Vollertsen beschrieben: Biegen mit Temperaturgradient, Beulen und Stauchen [2].

In Untersuchungen von Vollertsen et al. zum Laserstrahlbiegen dünner Bleche (Blechedicke zwischen 0.1 mm und 0.87 mm) wurde herausgefunden, dass Biegewinkel in beide Richtungen realisiert werden können [3]. Bei Experimenten mit gleichbleibender Laserspotgröße und -leistung konnte gezeigt werden, dass die gleichen Absolutwerte für den resultierenden Biegewinkel erreicht werden. Die Biegerichtung ist demnach abhängig von der bereits vorhandenen Krümmung des Blechs und der Kinetik der Eigenspannungsrelaxation während der Erwärmung. Bei höheren Prozessgeschwindigkeiten nimmt der Betrag des resultierenden Biegewinkels ab und die Biegerichtung stabilisiert sich zu einer Biegung zum Laserstrahl hin. [3]

Weitere Untersuchungen von Ueda et al. weisen darauf hin, dass die Biegewinkel mit größerem Laserfleckdurchmesser zunehmen und mit zunehmender Werkstückdicke abnehmen [4]. Darüber hinaus identifizierten Che Jamil et al. die vom Laserstrahlprofil abhängige Temperaturverteilung als einen wichtigen Faktor für die Simulation des Beulmechanismus [5].

Der Einfluss der Prozessparameter beim Laserstrahlbiegen wurden unter anderem von Bartkowiak et al. experimentell untersucht [6]. Für den Biegeprozess dünner Stahlbleche (Dicke: 0.2 mm) wurden die Einflüsse der Scangeschwindigkeit des Laserstrahls, der Anzahl an Bestrahlungszyklen und der Wartezeit zwischen den Bestrahlungszyklen mit einem Laserfleckdurchmesser von 0.2 mm untersucht. Dabei wurde beobachtet, dass der Biegewinkel mit zunehmender Anzahl Bestrahlungszyklen zunimmt, die Zunahme pro Zyklus jedoch mit steigender Zyklenzahl abnimmt. Die Wartezeit zwischen den Bestrahlungszyklen hatte in der Untersuchung keinen deutlichen Einfluss, was darin

begründet sein kann, dass die kleinste untersuchte Wartezeit von 10 Sekunden bereits ausreichend lang ist. Der Einfluss der Scangeschwindigkeit wurde in Versuchen mit jeweils 30 Bestrahlungszyklen ermittelt. Hierbei resultierte eine höhere Scangeschwindigkeit in kleinere Biegewinkel. Bei einer Geschwindigkeit von 30 mm/s wurde ein Biegewinkel von 45° erreicht; bei einer Geschwindigkeit von 100 mm/s wurde hingegen ein Biegewinkel von 8° erreicht. [6]

Der Laserstrahlbiegeprozess wurde von Gollo et al. anhand einer statistischen Versuchsplanung untersucht [7]. Dabei wurde die Anzahl der Bestrahlungszyklen als Haupteinflussfaktor ermittelt. Darüber hinaus wird der Einfluss der Parameter Material, Blechdicke, Laserscangeschwindigkeit und -durchmesser in absteigender Reihenfolge genannt. Diesen Untersuchungen zufolge haben die Parameter Laserleistung und Laserpulsdauer nur einen geringen Einfluss auf das Biegeergebnis [7]. Diese Aussage basiert auf den experimentellen Untersuchungen mit drei Einstellungen je Parameter. Dabei ist auffällig, dass sowohl für die Laserleistung als auch die Laserpulsdauer je zwei Parametereinstellungen zu nahezu unveränderten Biegewinkeln führen.

Shen et al. konnten anhand von Experimenten mit Stahlblechen in einem Wasserbad zeigen, dass das Laserstrahlbiegen auch unter Wasser möglich ist [8]. Je weiter die Probe mit Wasser bedeckt wurde, desto geringer scheint die am Werkstück ankommende Laserstrahlenergie zu sein, weswegen ein geringerer Biegewinkel resultiert. Für Proben, die im Wasserbad lagen, jedoch nicht vom Wasser bedeckt wurden, konnte ein größerer Biegewinkel ermittelt werden als bei Referenzversuchen mit Luft als Umgebungsmedium. Dies wird mit der erhöhten Abkühlung und der damit verbundenen Steigerung des Temperaturgradienten erklärt. [8]

Von Henninge et al. konnte gezeigt werden, dass mit einer Regelkreissteuerung ein Biegewinkel von 10° mit einer Genauigkeit von 0.2° eingestellt werden kann [9].

Ein Großteil der plastischen Verformung beim Laserstrahlbiegen wird den Untersuchungen von Thomsen et al. zufolge bereits innerhalb der ersten 0.2 Sekunden, nachdem der Laserstrahl das zu biegende Blech verlassen hat, erreicht [10].

Beim Laserstrahlbiegen mit einem gradlinigen Laserstrahlpfad ergibt sich eine Biegelinie entlang dieses Pfads. Diese Biegelinie ist in Blechdickenrichtung gekrümmt, was als Kanteneffekt (engl. *edge effect*) betitelt wird. Bao und Yao konnten experimentell und simulativ zeigen, dass der Kanteneffekt durch ein konvexes oder konkaves Profil im Biegewinkelverlauf entlang des Laserpfads gekennzeichnet ist [11]. Die Krümmung verläuft konvex, wenn der Temperaturgradientenmechanismus dominierend ist und das Blech zum Laserstrahl gebogen wird. Eine konkave Krümmung der Biegekante wird erreicht, wenn der Beulmechanismus dominiert und eine Biegung vom Laserstrahl weg

erzeugt wird [11]. Thomsen et al. untersuchten die Möglichkeit, diesen Effekt durch eine gezielte Abkühlung zu verringern, was jedoch nicht erfolgreich war [12]. Shen et al. konnten durch die gezielte Anpassung der Bestrahlungsgeschwindigkeit die Biege-
winkelvariation über den Bestrahlungspfad von 1.29 % auf 0.38 % verringern [13]. Allerdings wurde gleichzeitig ein geringerer Biege-
winkel realisiert. Die relative Variation des Biege-
winkels wurde von 16 % auf 5.6 % reduziert [13].

Shi et al. untersuchten die Möglichkeit, den Kanteneffekt durch unterstützend aufge-
brachte Kräfte zu verringern [14]. Sowohl eine über die freie Kante gleichmäßig verteilte
Krafterbringung als auch zwei gleichgroße Kraftaufbringungen an den Ecken der
nicht eingespannten Kante führten nur zu einer geringen Reduktion des Kanteneffekts.
Durch die Aufbringung unterschiedlich großer Kräfte an den Ecken der nicht einge-
spannten Kante wurde ein deutlicher Effekt erzielt. Eine Kraft von 10 N auf der Seite,
an der der Prozess startet und eine Kraft von 2 N auf der Seite, an der der Prozess endet,
führten zu einer Reduktion der Biege-
winkelvariation über die Blechlänge von 79.2 %.
[14]

Birnbaum et al. identifizierten die Einspannung als Einflussfaktor für das Biegeergebnis
und berichteten vom Einfluss des Laserbestrahlungspfadabstands von der Einspannung
[15]. Eine ungleichmäßige Temperaturverteilung und die Einspannbedingung werden
auch von Hu et al. als ursächlich für den Kanteneffekt angesehen [16]. Um den Unter-
schied in der plastischen Dehnung zu verringern, wird eine neue Einspannstrategie vor-
gestellt, bei der die Ausdehnung entlang des Laserbestrahlungspfads unterbunden wird,
wohingegen die anderen Kanten nicht festgelegt sind. Die Wirksamkeit dieser Maß-
nahme wird simulativ und experimentell dargestellt. [16]

Neben der Blechbearbeitung mit kontinuierlichen Laserstrahlquellen, ist auch die Ver-
wendung gepulster Strahlquellen für die Biegebearbeitung geeignet. Untersuchungen
von Maji et al. konnten zeigen, dass sich bei konstanter Streckenenergie ein optimaler
Wert für die Überlappung und den Abstand der Laserpulse ergibt, der zum maximalen
Biege-
winkel führte [17]. Zudem gab es ein Optimum bei der Bearbeitungsfrequenz, das
in dieser Untersuchung bei 100 Hz lag [17].

Bei der Herstellung von gleichmäßigen Biegeradien mittels Laserstrahlbiegen konnte
von Thomsen et al. gezeigt werden, dass es einen Übergang zwischen einer diskreten
Biegung mit je einem Biege-
winkel pro Bestrahlungspfad und einer kontinuierlichen
Blechbiegung gibt, der abhängig von der Anzahl der Laserbearbeitungspfade und deren
Abstand zueinander ist [18].

Shidid et al. beschreiben, dass die Effizienz des Laserstahlbiegens maßgeblich von der
Absorption der Oberfläche abhängt und untersuchten den Einfluss von Graphit und ei-

ner temperaturstabilen Farbe auf den resultierenden Biegewinkel [19]. Mit dem Blech, das mit der Farbe vorbehandelt wurde, konnte nach dem ersten Bestrahlungszyklus der höchste Biegewinkel erreicht werden, jedoch gleicht sich das Resultat bereits nach dem dritten Bestrahlungszyklus dem des unbehandelten Blechs an, was die Autoren auf ein Verbrennen der Farbe durch den Laserstrahl zurückführen. Die Graphitbeschichtung führte konstant zu höheren Biegewinkeln als dies ohne eine Beschichtung realisiert werden konnte. [19]

Zudem untersuchten Shidid et al. den Einfluss von Schutzgas auf den resultierenden Biegewinkel [19]. Der Biegewinkel konnte durch den Einsatz von Argon (an der Oberseite) und Helium (an der Unterseite) als Schutzgas signifikant gesteigert werden. Dies wird auf die abkühlende Wirkung des Schutzgases und die damit einhergehende Erhöhung des Temperaturgradienten zurückgeführt. [19]

Shi et al. beobachteten, dass beim Laserstrahlumformen von Oberflächen neben dem Biegen auch eine Verdickung auftritt und beschreiben eine Kombination (engl. *coupling mechanism*) des Temperaturgradientenmechanismus und des Beulmechanismus [20].

Durch eine spezielle Blechvorbereitung mit Sacklöchern entlang der Biegelinie konnte Woizeschke [21] bei einseitiger Zugänglichkeit für den Laserstrahl einen bidirektionalen Biegeeffekt realisieren.

Edwardson et al. führten die Verringerung des Biegewinkels pro Laserbestrahlungszyklus auf die Faktoren der Verfestigung, Aufdickung, Absorptionsänderung sowie auf thermische und geometrische Effekte zurück [22]. Um den Effekt der Absorptionsänderung zu vermeiden, wurden die Bleche mit Graphit beschichtet [22].

Der geometrische Effekt des reduzierten Biegewinkels pro Laserbestrahlungszyklus beschreibt die veränderte Laserspotgeometrie auf dem Blech durch die bereits hervorgerufene Biegung [23]. Wird ein Blech horizontal einseitig gespannt, sodass das Blech bei der Laserbestrahlung nach oben biegen kann, und der Laserstrahl senkrecht einfällt, ergibt sich auf der gebogenen Blechseite mit steigendem Biegewinkel eine zunehmend elliptische Laserspotgeometrie. Die hierdurch hervorgerufene Flächenvergrößerung und damit einhergehende Intensitätsabnahme ist ein Faktor, der zu einer degressiven Biegewinkelzunahme führt. [23]

Der Effekt einer degressiven Biegewinkeländerung bei Mehrfachbestrahlungen wurde auch von Sprenger et al. [24] beschrieben. Dieser Effekt wird auf die erhöhte Dehnungsrate und die Verfestigung des Materials zurückgeführt.

Die Auswirkungen der Dehnungsrate wurden von Li und Yao isoliert vom Einfluss ansteigender Maximaltemperaturen betrachtet [25]. Es wurden Biegewinkel und auftretende Dehnungsraten von laserbestrahlten niedriglegierten Stahlblechen (AISI 1010)

gemessen, wobei die Bestrahlungsleistung und die Prozessgeschwindigkeit variiert wurden, die im Bestrahlungsprozess auftretende Maximaltemperatur jedoch gleich blieb. Es konnte gezeigt werden, dass unter den vorliegenden Bedingungen die resultierenden Biegewinkel um 30 % reduziert wurden, wenn eine nahezu doppelte Dehnungsrate gemessen wurde. [25]

Darüber hinaus untersuchten Li und Yao ebenfalls die Auswirkungen einer konstant gehaltenen Streckenenergie [26]. Dabei wurde beobachtet, dass der resultierende Biegewinkel mit steigender Laserstrahlgeschwindigkeit anstieg, dieser Anstieg jedoch zunehmend geringer wurde. Dies wird auf die höhere Dehnungsrate bei höheren Laserstrahlgeschwindigkeiten zurückgeführt. Durch höhere Dehnungsraten steigt auch die Fließgrenze, wodurch der Anstieg des Biegewinkels mit zunehmenden Laserbestrahlungen abnimmt. [26]

Die bei einem inkrementellen Laserstrahlbiegeprozess auftretenden Quer- und Längsspannungen konnten von Tetzl et al. [27] kontinuierlich in-situ gemessen werden. Dabei wurden die Spannungen auf Basis von Materialeigenschaften und (elasto-plastischen) Dehnungen und Temperaturen bestimmt. Es konnten Unterschiede zwischen den Materialien Aluminium und nichtrostendem Stahl festgestellt werden, wenngleich der resultierende Biegewinkel der Versuche durch die Anpassung der Laserstrahlleistung gleich ausfiel. Es zeigt sich, dass bei Versuchen mit Aluminiumblechen die Abkühldauer zwischen den Bestrahlungszyklen einen Einfluss auf die auftretende longitudinale Spannung und den resultierenden Biegewinkel hat, während ein solcher Effekt bei Versuchen mit nichtrostenden Stahlblechen nicht auftrat. Eine Verlängerung der Abkühldauer führte für Aluminiumbleche zu größeren Biege winkeln und einer reduzierten longitudinalen Spannung. [27]

Neben den Materialien Stahl und Aluminium können diverse andere Materialien ebenfalls mit dem Prozess des Laserstrahlbiegens bearbeitet werden. Dazu zählen beispielsweise Borosilikatglas [28], Nickel [29], Titan [30], Kupfer [31], Silizium [32] und verschiedene Keramiken [33]. Auch besonders nickelhaltiger Stahl (Nickelanteil 40 %), der für Leitungsträger (engl. *leadframes*) verwendet wird, kann mit dem Prozess des Laserstrahlbiegens bearbeitet werden [34].

Eine Anwendungsmöglichkeit zum Laserstrahlbiegen von Kupfer wird von Lazarus et al. beschrieben [35]. Aus einer Kupferfolie mit einer Dicke von 76 μm wird ein Muster ausgeschnitten und per Laserstrahlbiegen eine toroidale Form erzeugt. Die so hergestellte Spule kann den Autoren zufolge als Induktor dienen. [35]

Das Laserstrahlbiegen wird bereits zum Richten nach dem Schweißen von Stringern für Flugzeugstrukturelemente eingesetzt. Für ein solches Element werden mehrere Stringer,

die in einer T-Stoß-Konfiguration angeordnet und parallel ausgerichtet sind, zur Versteifung auf ein in der Regel unter 1 mm dickes Hautblech geschweißt. Aufgrund der parallelen Schweißprozesse und dem dadurch induzierten Verzug weist das Hautblech eine inakzeptable Formabweichung in Form einer Wölbung senkrecht zur Stringerorientierung auf. Durch eine nachfolgende Laserbestrahlung der den Stringern gegenüberliegenden Hautblechseite kann die Formabweichung reduziert werden.

Dieser Richtprozess ist für verschiedene Materialien wie Titan [36], nichtrostenden Stahl [37] und Aluminium [38] gut charakterisiert. Engler legte den Grundstein für einen Schweiß- und Richtprozess für 0.8 mm dicke Titan-HLFC-Strukturen [36]. Die HLFC – Hybrid Laminar Flow Control – ist ein Konzept zur aktiven Grenzschichtabsaugung an Trag- und Leitwerksflächen von Flugzeugen und soll den Anteil laminarer Umströmung erhöhen und in einer signifikanten Senkung des Treibstoffverbrauchs resultieren. Dieser Prozess konnte von Schultz et al. für den Flugzeugbau auf realistische Größenordnungen mit Stringerschweißnahtlängen von 1920 mm umgesetzt werden [39].

Neben Untersuchungen zum Laserstrahlbiegen eines Biegewinkels wurden Untersuchungen zum Biegen komplexerer Blechgeometrien durchgeführt. Lazarus und Smith zeigten, dass aus nichtrostender Stahlfolie mit einer Dicke von 100 μm zunächst Formen ausgeschnitten werden können, die anschließend mit dem Temperaturgradientenmechanismus zu Würfeln geformt werden [40]. Kim und Na präsentierten zwei Ansätze, ein Blech anhand einer kubischen Spline-Kurve zu formen [41]. Beim Algorithmus mit distanzbasiertem Kriterium wird iterativ jeweils ein neuer Bearbeitungspunkt auf der Kontur platziert, wenn die Abweichung der Geraden zwischen zwei Bearbeitungspunkten von der Sollgeometrie einen Grenzwert überschreitet. Bei dieser Methode ergibt sich für jeden Bearbeitungspunkt ein anderer Sollwert für die Laserstrahlbiegung, weshalb jeweils angepasste Parameter verwendet werden müssen. Beim Algorithmus mit winkelbasiertem Kriterium werden Tangenten an die Sollgeometrie angelegt, wobei der Übergang zwischen den Tangenten unterhalb eines definierten Grenzwinkels bleiben muss. Bei dieser Methode kann jeweils der gleiche Parametersatz für die Laserstrahlbiegung verwendet werden, da jeweils der gleiche Winkel zu erreichen ist. Jedoch resultiert dieses Vorgehen in einer größeren Abweichung zur Sollgeometrie als beim Verfahren mit distanzbasiertem Kriterium [41]. Die Autoren konnten diese Methoden auch auf dreidimensionale Sollgeometrien übertragen [42].

Safari und Farzin berichten von der Möglichkeit sattelförmige Strukturen, wodurch bei einem quadratischen Blech zwei gegenüberliegende Kanten konvex und die anderen beiden Kanten konkav geformt sind, mit einem spiralförmigen Laserbestrahlungspfad herzustellen [43]. Chakraborty et al. stellten ein komplexes Bestrahlungsmuster aus li-

nearen Bestrahlungspfaden für das Laserstrahlformen von Kissenformen vor, wobei alle Kanten eines quadratischen Blechs die gleiche Wölbung aufweisen [44]. Dabei wurde eine Kombination des Temperaturgradienten- und des Kopplungsmechanismus eingesetzt [44].

Gao et al. ermittelten für die Realisierung einer Freiformfläche durch Laserstrahlbiegen zunächst das benötigte Dehnungsfeld [45]. Daraufhin wurden Linien in einem Abstand von 3 mm auf der Oberfläche verteilt und Bearbeitungsparameter für Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Laserstrahlfokussierung gewählt, die zuvor anhand von Simulationen und Experimenten ermittelt wurden. [45]

Die Verwendung von unter anderem radialen und zirkularen Bearbeitungspfaden beim Laserstrahlbiegen wurde von Gisario et al. präsentiert [46].

Neben dem Biegen von Blechen kann der Laserstrahl auch zum Biegen von Volumenkörpern genutzt werden, wie Imhan et al. am Beispiel von Rohren aus nichtrostendem Stahl zeigten [47]. Folkersma et al. zeigten, dass dünnwandige Rohre (57 μm bis 152 μm) aus nichtrostendem Stahl mit einer Präzision von 0.1 μm ausgerichtet werden können [48]. Des Weiteren wird die Möglichkeit, Nickelrohre mit einer Wanddicke von 50 μm mit einem Laserstrahlbiegeprozess zu bearbeiten, von Che Jamil et al. gezeigt [29]. Wang et al. demonstrierten darüber hinaus, dass nichtrostende Stahlrohre durch eine Laserbestrahlung zu Spiralen geformt werden können [49].

Bucher et al. zeigten, dass Sandwichpanele mit Metallschaumfüllung durch den Prozess des Laserstrahlbiegens bearbeitet werden können [50]. Dabei ist im Besonderen der Wärmeübergang zwischen dem Deckblech und dem Schaumkern maßgeblich für den resultierenden Biegewinkel. Es kann gezeigt werden, dass größere Laserstrahldurchmesser hierbei effektiver sind als kleinere, was auf den geringeren Einfluss der Oberblechverdickung auf die Effizienz des Biegemechanismus zurückgeführt wird. [50]

2.1.2 Formgebende Prozesse mit unterstützender Laserbestrahlung

Neben dem Biegen kann Laserstrahlung auch zur Unterstützung konventioneller Umformprozesse eingesetzt werden. Zum Beispiel zeigen Gisario et al. das Potenzial der Laserstrahlung zur Unterstützung des mechanischen Biegens von Aluminiumblechen (EN AW-6082 T6), um die Rückfederung zu kontrollieren [51]. Den Vorteil der reduzierten Rückfederung beim mechanischen Biegen mit Laserunterstützung konnten Gisario, Barletta und Venttacci auch bei den Werkstoffen Titan (Grade 2) und Aluminium (EN AW-7075 T6) zeigen [52]. Die Rückfederung betrug in Experimenten ohne Laserunterstützung noch 7° bei Titanblechen und 19° bei Aluminiumblechen, wohingegen mit einer Laserunterstützung weniger als 2° Rückfederung auftraten [52]. In einer weiteren Studie konnten Gisario et al. den Prozess des Titanblechbiegens mit Laserunter-

stützung auch durch eine numerische Simulation darstellen [53]. Der verwendete Absorptionsgrad und eine etwaige Veränderung infolge der vorhergehenden Bearbeitung wird dabei nicht erwähnt.

Geiger et al. zeigten, dass der Biegewinkel durch das laserunterstützte Biegen um etwa 200 % vergrößert werden kann [54]. Durch die Laserbestrahlung im unverformten Zustand kann die Martensitphase eines Stahls entfestigt werden, wodurch die Mechanismen der Umformung, d.h. Kaltverfestigung und verformungsinduzierte Martensitbildung, nahezu kompensiert werden. [54]

Klocke und Brummer berichteten, dass beim Metalldrücken durch eine Laserstrahlerwärmung die Umformbarkeit erhöht und präzisere Temperaturfelder als mit herkömmlicher Erwärmung durch Gasbrenner realisiert werden können [55].

Ein weiterer Prozess mit Laserstrahlunterstützung wurde von Ueda et al. präsentiert. Die Autoren beschreiben, dass der Beulmechanismus zur Abflachung von Ausbuchtungen in Stahlblechen genutzt werden kann [56]. Eine weitere Anwendung des Lasers in Umformprozessen ist das Einzelpunkt-Inkrementumformen mit Lasererwärmung auf der Rückseite des Blechs.

Duflou et al. identifizierten eine Kraftreduzierung und eine Erhöhung der Umformbarkeit durch eine Laserstrahlerwärmung [57]. Zusätzlich wurden reduzierte Rückfederungseffekte und reduzierte Spannungsniveaus erreicht.

Diese Vorteile wurden auch von Hino et al. bei der Durchführung des inkrementellen Kegelstumpfumformens von Blechen aus Magnesiumlegierungen beobachtet [58].

Biermann et al. untersuchten das inkrementelle Titanblechumformen mit Laserunterstützung auf der gleichen Blechoberfläche wie das Umformwerkzeug. In dieser Studie wurde die maximale Umformtiefe bei Vorwärmtemperaturen von 400 °C signifikant erhöht [59].

In weiteren Studien entwickelten Göttmann et al. einen neuen Aufbau für das laserunterstützte asymmetrische inkrementelle Blechumformen, bei dem der Laserstrahl um das Umformwerkzeug geführt wird [60]. Mit diesem Aufbau konnten die Vorteile der Laserstrahlerwärmung für das asymmetrische Umformen bestätigt werden, allerdings war die Temperaturmessung anspruchsvoll, sodass der Bedarf eines geeigneten Regelungskonzepts identifiziert wurde. Alternativ würde die Kenntnis des sich ändernden Absorptionsvermögens der Oberfläche helfen, die Temperatur während des Prozesses konstant zu halten. Bislang wurden Änderungen des Absorptionsvermögens durch mehrfache Laserbestrahlung nicht berücksichtigt.

2.1.3 Modellierung formgebender Laserstrahlprozesse

2.1.3.1 Analytische Modelle für formgebende Laserstrahlprozesse

Vollertsen definiert ein Zweischichtmodell, um das Laserbiegen mit dem Temperaturgradientenmechanismus vorherzusagen [61]. Dieser in Gleichung (2.1) beschriebene analytische Ansatz ermöglicht Biegewinkelberechnungen auf der Grundlage des Energieeintrags, des Materials und der geometrischen Parameter.

$$\alpha_B = \frac{3\alpha_{th}PA}{\rho c_p v s^2} \quad (2.1)$$

Hierbei ist α_B der Biegewinkel, α_{th} der thermische Ausdehnungskoeffizient, P die Laserstrahlleistung, A der Absorptionskoeffizient, ρ die Dichte, c_p die spezifische Wärmekapazität, v die Prozessgeschwindigkeit und s die Werkstückdicke.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgten auch Yau et al., die jedoch den Ansatz des Zweischichtmodells um einen Term zur Berücksichtigung des Effekts der Gegenbiegung erweiterten [62]. Dadurch soll ein Teil der rein elastischen Dehnung berücksichtigt werden.

Das von Lambiase vorgestellte Modell basiert auf der Berechnung eines thermischen Feldes und der Kalkulation der daraus resultierenden Verformung ohne Berücksichtigung der plastischen Verformung während der Erwärmungs- und Abkühlungsphasen [63]. Der Grundgedanke ist, ein Zweischichtenmodell ähnlich dem von Vollertsen [61] zu verwenden, wobei die Dicke der erwärmten Schicht von der effektiven Temperaturverteilung entlang der Blechdicke abhängt. Das Modell ist insbesondere für die Stähle AISI 304 und D36 geeignet, wohingegen Vergleiche mit Experimenten an der Aluminiumlegierung AA6013 nur qualitative Aussagen zum resultierenden Biegewinkel zulassen. Dies wird mit der Auswirkung der hohen Wärmeleitfähigkeit von Aluminium begründet, da dieser Kennwert im Modell nicht berücksichtigt wird. Die angegebenen Absorptionsgrade unterscheiden sich je nach Werkstoff: 42 % für den nichtrostenden Stahl AISI 304, 30 % für den Stahl D36 und 20 % für die Aluminiumlegierung AA6013. [63]

Das mathematische Modell von Kyrsanidi et al. [64] berücksichtigt die Abmessungen des Blechs, die Laserparameter und die Temperaturabhängigkeit der Materialeigenschaften und zeigt eine gute Übereinstimmung sowohl mit dem Experiment als auch mit der numerischen Simulation, welche jedoch deutlich längere Berechnungszeiten benötigten. Für die Bearbeitung der zwei untersuchten Stähle mit einem CO₂-Laser wurden

Absorptionsgrade von 30 % für 1.0584 und 70 % für St1403¹ angenommen, wobei angegeben wird, dass der Werkstoff 1.0584 sandgestrahlt wurde und der Werkstoff St1403 mit einer Oxidschicht überzogen ist [64].

Cheng und Lin konnten mit einem zweistufigen Modell, welches erst die plastischen Veränderungen durch den Erwärmungsprozess und anschließend die des Abkühlungsprozesses mit jeweils angepassten Materialkennwerten berücksichtigt, zeigen, dass die Vorhersagegenauigkeit gegenüber anderen Modellen, unter anderem dem von Vollertsen [61], steigt [65]. Hierbei wurde ein Absorptionsgrad von 60 % für die Bearbeitung eines nichtrostenden Stahlblechs (Werkstoff: „304 stainless steel“) mit einem CO₂-Laser angenommen [65].

Darüber hinaus haben Cheng et al. ein Prognosemodell entwickelt, bei dem eine endliche Blechbreite und -länge berücksichtigt wird [66]. Begleitende Experimente haben gezeigt, dass der Biegewinkel abnimmt, wenn die Blechlänge konstant ist und die Blechbreite zunimmt. Dies wird auf die erhöhte Wärmesenkenwirkung bei zunehmender Blechbreite zurückgeführt. Der Biegewinkel nimmt hingegen zu, wenn die Blechbreite konstant ist und die Blechlänge zunimmt. Dies wird darauf zurückgeführt, dass der Biegewinkel entlang des Laserstrahlpfads ungleichmäßig ist und der Kanteneffekt bei erhöhter Blechlänge reduzierten Einfluss hat. Wenn sowohl die Blechlänge als auch die Blechbreite in gleichem Maße zunehmen, steigt der Biegewinkel an, bevor er aufgrund der konkurrierenden Effekte abnimmt. Diese Effekte werden von dem Modell korrekt abgebildet. Der verwendete Absorptionsgrad ist nicht angegeben. [66]

Shen et al. leiteten eine Formel für den Biegewinkel bei der Laserumformung ab, die auf der Historie der inkrementellen Spannungs-Dehnungs-Beziehung basiert [67]. Das Modell berücksichtigt die Laserparameter, die Temperaturabhängigkeit der Materialeigenschaften und die Blechdicke. Für den Werkstoff AISI 1010 wird ein Absorptionsgrad von 80 % angenommen, wobei weder eine Oberflächenbeschichtung noch die angenommene Wellenlänge des Lasers beschrieben wird. Mit dem Modell können die Biegewinkel sowohl für den Beulmechanismus, den Temperaturgradientenmechanismus, als auch für koexistierende Mechanismen aus diesen zwei Grundmechanismen vorhergesagt werden. [67]

Marya und Edwards führten in ihrem analytischen Modell zum Laserstrahlbiegen von Titanblechen dimensionslose Parameter ein [68]. Dadurch konnte die Anzahl der Vari-

¹ Es wird angenommen, dass die genannte Bezeichnung „St1403“ einem Stahl der Güte DC04 (Werkstoffnummer 1.0338) entspricht

ablen, die ein beginnendes Schmelzen definieren, auf drei reduziert werden: das Verhältnis von Blechdicke zu Laserspotdurchmesser, die dimensionslose Geschwindigkeit und die dimensionslose Leistung. Neben dem Laserspotdurchmesser berücksichtigt die dimensionslose Geschwindigkeit die Temperaturleitfähigkeit des Materials. Die dimensionslose Leistung berücksichtigt den Absorptionsgrad, die Temperaturdifferenz zwischen Umgebungs- und Schmelztemperatur und die Wärmeleitfähigkeit. Der gemessene Absorptionsgrad für die Titanlegierung Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo beträgt im Mittel 48 %. [68]

2.1.3.2 Numerische Simulation formgebender Laserstrahlprozesse

Für die Berechnung des vorliegenden Temperaturfeldes wurde von Ji und Wu zunächst ein vereinfachtes Berechnungsmodell unter Vernachlässigung der thermomechanischen Kopplung präsentiert [69]. Dieses Modell zeigt, dass die Spitzenwerte der Temperatur an der Ober- und Unterseite mit zunehmender Laserleistung steigen, mit zunehmender Blechdicke und Prozessgeschwindigkeit jedoch abnehmen. Die Temperaturdifferenz in Dickenrichtung nimmt hingegen mit zunehmender Laserleistung und Blechdicke sowie mit zunehmender Prozessgeschwindigkeit zu. Für die Berechnungen wurde für einen unlegierten Stahl² eine Absorption von 50 % angenommen. [69]

Hu et al. entwickelten ein finite Elemente Modell, das eine nichtlineare, transiente, indirekt gekoppelte thermisch-strukturelle Analyse umfasst, die die Temperaturabhängigkeit der thermischen und mechanischen Eigenschaften der Materialien berücksichtigt [70]. Das Modell ist in der Lage den Biegewinkel, die Verteilung von Spannung und Dehnung, die Temperatur und die Eigenspannung zu ermitteln. Dabei wurde sowohl simulativ als auch experimentell gezeigt, dass sich zunächst aufgrund der thermischen Spannung während des Aufheizens eine Biegung zur Laserstrahl abgewandten Seite einstellt. Beim Abkühlen stellt sich dann eine plastische Verformung in Richtung des Laserstrahls ein. Die bei der Berechnung angenommene Absorption wird nicht genannt. [70]

Bei der Simulation eines Laserstrahlbiegeprozesses konnte von Shen et al. gezeigt werden, dass die Zeit zwischen den Laserbearbeitungen einen Einfluss auf den Biegewinkel hat [71]. Unter der Annahme eines konstanten Absorptionsgrads von 60 % für den unlegierten Stahl 1.0584 zeigen die Simulationsergebnisse, dass die zweite Laserstrahlbearbeitung zum gleichen Zuwachs des Biegewinkels wie bei der ersten Laserstrahlbearbeitung führt, wenn die Zwischenzeit mindestens 13 Sekunden beträgt [71]. Dieses Er-

² Es wird angenommen, dass die genannte Bezeichnung „08 steel sheet“ einem Stahl der Güte DD13 (Werkstoffnummer 1.0335) entspricht

gebnis lässt jedoch außer Acht, dass Umgebungsbedingungen wie die Beschaffenheit und Absorption der Oberfläche durch die erste Laserbearbeitung verändert sein könnten. Numerische Simulationen von Laserstrahlbiegeprozessen wurden von diesen Autoren zudem auf einen Prozess mit zwei parallel geführten Laserstrahlen angewendet, wobei die angenommene Absorption in diesem Fall nicht genannt wird [72].

Griffiths et al. berücksichtigen in ihrem Finite Elemente Modell zudem den ebenfalls von Edwardson et al. [23] beschriebenen geometrischen Effekt der reduzierten Laserleistungsdichte durch eine Vergrößerung der Laserspotfläche auf dem bestrahlten Werkstück infolge des Biegeeffekts [73]. Für die Simulation wurde ein Absorptionsgrad von 80 % für den Stahl AISI 1010 angenommen, wobei ein CO₂-Laser für den experimentellen Vergleich genutzt wurde. Durch die Biegung des Werkstücks wird die ursprünglich runde Laserspotabbildung auf dem Werkstück auf der gebogenen Hälfte zunehmend elliptisch. Dieser Effekt der abnehmenden Leistungsdichte ist den Autoren zufolge ab einem Biegewinkel von 35° signifikant. [73]

Castillo et al. zeigten, dass die resultierenden Biegewinkel bei einer Variation der Laserstrahlleistung und Scangeschwindigkeit mit einem viskoplastischen Modell, in dem die Dehnungsrate bei der berechneten Materialfließbedingung berücksichtigt wird, genauer berechnet werden können als mit einem rein plastischen Modell [74]. Insbesondere wurde gezeigt, dass ein solches Modell Überspannung, die sich bei hohen Temperaturen entwickelt, korrekt beschreibt, wodurch auch große Biegewinkel, die in den Fällen mit hoher Streckenenergie erreicht werden, durch die Simulation berechnet werden können. Für die Berechnungen wurde für den graphitbeschichteten nichtrostenden Stahl AISI 304 eine Absorption von 64 % angenommen [74].

Na und Kim zeigten, dass auch ein wenig komplexes Berechnungsmodell ausreicht, um freie Oberflächen mittels Laserstrahlbiegen herzustellen [75]. In ihrem Berechnungsansatz wird die Zielgeometrie in plane Oberflächensegmente eingeteilt. Auf eine Berücksichtigung der Spannungen und Dehnungen wird in der Analyse verzichtet, was den Berechnungsaufwand reduziert. Im Experiment konnte gezeigt werden, dass die Genauigkeit des Biegeergebnisses mit einer Erhöhung der Segmentanzahl gesteigert werden kann. Der für die Simulation verwendete Absorptionsgrad wird jedoch nicht genannt. [75]

Grden präsentierte eine Methode zur Gebietszerlegung zur Reduzierung der Berechnungszeit am Beispiel eines thermischen Biegeprozesses [76]. Die Methode basiert auf der Idee, den zu berechnenden Prozess in mehrere Teilstrukturen zu zerlegen, die thermischen und mechanischen Berechnungen getrennt voneinander durchzuführen und diese in einem anschließenden Reintegrationsschritt zusammenzuführen. Die Methode erzielt Vorteile bei Prozessen mit mehr als drei Bestrahlungszyklen, da diese zur Be-

stimmung von Randbedingungen genutzt werden. Folgende Zyklen können in etwa einem Zehntel der Berechnungszeit einer Standard-FEM-Anwendung berechnet werden. Ein Vergleich mit experimentellen Ergebnissen zeigt eine durchschnittliche Abweichung von 16 % nach zehn Bestrahlungszyklen. Dabei wurde für die graphitbeschichteten nichtrostenden Stahlbleche (Werkstoff: 1.4301) ein Absorptionsgrad von 90 % angenommen. [76]

Eine Reduzierung der Berechnungsdauer um 28 % bei einer Vorhersageabweichung von 6 % konnte von Pitz et al. bei der Simulation eines Laserstrahlbiegeprozesses von graphitbeschichteten Aluminiumblechen mit einer der Prozessbewegung angepassten Vernetzungsstruktur erreicht werden [77]. Hierfür wurde ein Absorptionsgrad von 80 % angenommen [77]. Das Potential dieses Verfahrens konnte auch für zweidimensionale Biegeprozesse mit einem kreisförmigen Bestrahlungspfad und für Bleche nicht gleichmäßiger Dicke aufgezeigt werden [78].

Die Berechnungsdauer wurde in Simulationen von Hu et al. durch eine Vereinfachung des FE-Modells reduziert [79]. Durch die Verwendung eines Modells basierend auf mehrschichtigen Schalenelementen konnte die Anzahl der Elemente auf ein Drittel reduziert werden. Dadurch konnten die Berechnungszeiten für die thermische Analyse um 50.83 % und für die mechanische Analyse um 94.67 % reduziert werden. Verglichen mit experimentellen Ergebnissen wird bei der Simulation mit dem Multischichtmodell ein um 5.86 % geringerer mittlerer Biegewinkel berechnet. Bei der Vergleichssimulation mit einem Vollkörpermodell ergeben die Berechnungen einen um 3.50 % größeren mittleren Biegewinkel. Dabei wurde ein Absorptionsgrad von 55 % für die Bearbeitung graphitbeschichteter nichtrostender Stahlbleche (Werkstoff: „ANSI 304 stainless steel“) mit einem CO₂-Laser angenommen. [79]

2.2 Absorption von Laserstrahlung

2.2.1 Grundlagen

Die Prozesseffizienz wird maßgeblich durch den Absorptionsgrad der eingesetzten Laserstrahlung vom Werkstück bestimmt. Darüber hinaus ist das Absorptionsvermögen ein wichtiger Parameter für Simulationen und Vorhersagen von Laserstrahlprozessen wie dem Laserstrahlbiegen.

Bei der Materialbearbeitung hängt die Effizienz der Laserstrahlbearbeitung von der Absorption des bestrahlten Materials ab. Die Absorption von Laserstrahlung ist unter anderem abhängig von der Laserwellenlänge sowie vom bestrahlten Material und dessen Topografie.

Die Absorption von Laserstrahlung kann mithilfe der Fresnel-Gleichungen polarisationsabhängig bestimmt werden (z.B. [80]). Die Absorptionsanteile unterschiedlicher Polarisationen der einfallenden Strahlung an einer Grenzfläche mit zwei unterschiedlichen Brechungsindizes können mit folgenden Gleichungen bestimmt werden:

$$A_p = \frac{4 n_1 \cos\theta}{(n_1^2 + n_2^2)\cos^2\theta + 2 n_1 \cos\theta + 1} \quad (2.2)$$

$$A_s = \frac{4 n_1 \cos\theta}{n_1^2 + n_2^2 + 2 n_1 \cos\theta + \cos^2\theta} \quad (2.3)$$

wobei A die Absorption bei paralleler (Index p) und senkrechter (Index s) Polarisation, n_1 und n_2 den Real- und Imaginärteil des Brechungsindex (welcher wiederum wellenlängenabhängig ist) und θ den Einfallswinkel der Laserstrahlung zur Werkstücknormale darstellen. Für nicht polarisierte Strahlung kann angenommen werden, dass die Anteile paralleler und senkrechter Polarisation zu gleichen Teilen auftreten. Üblicherweise entsteht nicht polarisierte Strahlung bei Glasfaser geführten Laserstrahlquellen. Neuere Entwicklungen polarisationserhaltender Glasfaserkabel sind vorhanden [81], in der Anwendung jedoch noch nicht weit verbreitet. Die Nutzung polarisierter Strahlung könnte aufgrund der Absorptionserhöhung im Brewsterwinkel bei paralleler Polarisation interessant sein [82]. Diese Absorptionserhöhung wird bei nicht polarisierter Strahlung durch die Absorptionsabnahme der senkrecht polarisierten Strahlungsanteile kompensiert.

Die Absorption von nicht polarisierter Laserstrahlung mit einer Wellenlänge von $1.06 \mu\text{m}$ auf einer Stahloberfläche ist bei geringen Einstrahlwinkeln von bis zu 40° nahezu konstant [83]. Eine geringe Variation des Einstrahlwinkels bis 30° führte beim Härten mit dem Laserstrahl und der Verwendung nicht polarisierter Strahlung zu keinem erhöhten Absorptionswert [84].

Die effektive Absorption einer metallischen Oberfläche kann zudem von der realen Absorption abweichen, wenn durch die Bestrahlung der Oberfläche ein Plasma erzeugt wird. Besonders beim Schweißen mit CO_2 -Laserstrahlquellen kann es zur Plasmaabschirmung kommen [85]. Dabei wird, begünstigt durch die Wellenlänge des CO_2 -Lasers, die Laserstrahlenergie vom ionisierten Schutzgas (z.B. Argon) absorbiert.

Die Absorption von Laserstrahlung mit einer Wellenlänge von $1.064 \mu\text{m}$ in einem Lichtbogenplasma kann als vernachlässigbar klein angenommen werden, wie Messungen von Möller [86] bestätigen.

Neben den Untersuchungen zur Laserstrahlabschirmung durch Plasma, das oberhalb der Werkstückoberfläche durch die Ionisierung eines Gases erzeugt wird, wie es beim Schutzgas oder einem Lichtbogenprozess der Fall ist, wurde auch der Einfluss des Plasmas untersucht, welches durch den Laserstrahlprozess selbst erzeugt werden kann.

Baton et al. [87] untersuchten die Laserstrahlausbreitung mit einer Wellenlänge von $1.06 \mu\text{m}$ in einem Plasma. Je höher die Dichte des Plasmas im Experiment war, desto stärkere Wechselwirkungen mit dem Laserstrahl wurden beobachtet. In einem dichteren Plasma wurde der Laserstrahl stärker abgelenkt.

Rozman et al. [88] untersuchten die Absorptionsmechanismen von Laserstrahlung in einem Plasma und fanden heraus, dass für die Wellenlänge von 248 nm sowohl die inverse Bremsstrahlung, die aus der Mie-Streuung resultierende Absorption und der photoelektrische Effekt in Betracht gezogen werden müssen.

Gipperich et al. beschreiben bei der Verwendung von Laserstrahlquellen mit Wellenlängen um $1 \mu\text{m}$, dass durch den zusätzlichen Einsatz einer gepulsten Laserstrahlquelle die Absorption um 20% gegenüber der Verwendung eines Dauerstrichlasers gesteigert werden konnte [89]. Dies wird auf die Erzeugung eines Plasmas durch die gepulste Laserstrahlquelle zurückgeführt.

2.2.2 Messmethoden

Die Messung des Absorptionsvermögens beim Laserstrahlschweißen ist aufgrund des Phasenübergangs herausfordernd. Beim Tiefschweißprozess erschwert die Bildung einer Dampfkapillare die Absorptionsmessung zusätzlich. Simonds et al. haben während des Laserstrahlpulsschweißens im Bereich einiger Millisekunden den Absorptionsgrad des nichtrostenden Stahls AISI 316L bestimmt [90]. Dabei wurde die Absorption aus der Messung der reflektierten Strahlungsanteile errechnet. Die dafür eingesetzte Ulbrichtkugel wird durch die Entstehung eines Keyholes kontaminiert, weshalb die Bariumsulfatbeschichtung vor jedem Versuch erneuert werden musste. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Entstehung eines Keyholes die Absorption des Laserstrahlpulses auf über 80% ansteigt.

Absorptionswerte von typischerweise 80% werden auch in den Untersuchungen von Schneider et al. bei Messungen der Absorption verschiedener Materialien beim Laserstrahlbohren genannt, wenn die Laserstrahlintensität ausreichend hoch ist [91]. Für die Messung der Absorption wurde ebenfalls eine mit Bariumsulfat beschichtete Ulbrichtkugel verwendet. Hierbei wurden die Proben jedoch innerhalb der Ulbrichtkugel platziert. So konnte sowohl der reflektierte Anteil als auch der nach dem Durchbohren der Probe auftretende transmittierte Anteil der eingesetzten Laserleistung von der verwendeten Photodiode detektiert werden. [91]

Einen ähnlichen Ansatz zur Absorptionsbestimmung von metallischen Proben über eine Messung der Reflexion mit einer Ulbrichtkugel nutzte Bergström [92]. In dem beschriebenen Aufbau wird eine mit Bariumsulfat beschichtete Ulbrichtkugel mit einem Durchmesser von 150 mm eingesetzt. Die Ulbrichtkugel verfügte über sechs Öffnun-

gen; je eine für den einfallenden Laserstrahl zur Messung der Probe (#1) und einer Referenz (#2) sowie eine für die Probe (#3), die Referenz (#4) und den Detektor (#5). Die sechste wurde während der Absorptionsmessung nicht verwendet. Als Referenz wurde ein mit Bariumsulfat beschichteter Deckel verwendet. Die verwendete Laserstrahlquelle hatte eine maximale Ausgangsleistung von 1 W. Die geringe Laserleistung schließt eine Keyholeentstehung auf der Probe aus, weshalb eine Kontamination der Ulbrichtkugel durch von der Probe ausgehenden Metalldämpfe und Spritzer sicher ausgeschlossen werden kann. [92]

Eine weitere Möglichkeit der in-situ Messung der Laserstrahlabsorption stellt der kalorimetrische Ansatz dar. Bei der Bestimmung der Absorption von Laserstrahlung mit diesem Ansatz konnte von Trapp et al. bei der Additiven Fertigung im Pulverbettverfahren für den Werkstoff 316L ein ähnlich sprunghafter Anstieg bei der Erzeugung eines Keyholes beobachtet werden [93]. Für die Messung wurden zwei Thermoelemente in verschiedenen Abständen vom Laserstrahlpfad in einem Probenhalter platziert. Der Probenhalter wurde aufgrund der geringen thermischen Leitfähigkeit aus Aluminiumoxid hergestellt. [93]

Analysen mit einem kalorimetrischen Ansatz mit Thermoelementen wurden auch von Ricciardi und Cantello [94] vorgestellt. Verschiedene Beschichtungen wurden auf ihre absorptionserhöhende Eigenschaft untersucht, indem sie mit unterschiedlichen Laserstrahlintensitäten bestrahlt wurden. Die Laserstrahlbearbeitung führte zu unterschiedlichen Verhaltensweisen bezüglich der Änderung des Absorptionsvermögens [94].

Seibold nutzt für die Analyse der Absorption technischer Oberflächen zwei verschiedene Verfahren: die kalorimetrische Messung und die Reflektometrie [95]. Bei der kalorimetrischen Messung wird die Erwärmung eines thermisch isolierten Probenhalters durch die Laserbestrahlung der Probe gemessen. Die Probe wird vorher mit Wärmeleitpaste auf dem Probenhalter platziert, um einen möglichst guten Wärmeübergang herzustellen. [95]

Bei der von Seibold genutzten Methode der Reflektometrie wurde eine goldbeschichtete Ulbrichtkugel eingesetzt, in der die Proben auch oberhalb der Schmelztemperatur untersucht werden konnten [95]. Eine siliziumbasierte Photodiode wurde verwendet, um die von der Probe in die Ulbrichtkugel reflektierte Leistung zu messen. Der Messaufbau wurde anhand gebeizter Messingproben vor jeder Messung kalibriert. [95]

Für ihre Untersuchungen zum Laserstrahlbiegen mit komplexen Bestrahlungsmustern für die Erzeugung von Kissenformen schätzten Chakraborty et al. das Absorptionsvermögen durch Messung der reflektierten Laserstrahlung ab. Für nichtrostende Stahlbleche der Sorte AISI 304 wurde ein Durchschnittswert von 40 % ermittelt [44].

Abedi und Gollo [96] ermittelten die Auswirkungen der Rauheit und Cr_2O_3 -Schichtdicke auf das Absorptionsvermögen und die resultierenden Biegewinkel beim Laserstrahlbiegen eines nichtrostenden Stahlblechs (AISI 304). Die Absorptionsmessung wurde mit einem Spektrometer unter der Annahme durchgeführt, dass der nichtreflektierte Strahlungsanteil die Absorption des bestrahlten Werkstücks darstellt. Es wird keine Aussage zur möglichen Auswirkung diffuser Reflexion gemacht, die mit dem Messverfahren weder als Reflektion gemessen würde noch als Absorption des Werkstücks interpretiert werden dürfte.

2.2.3 Temperatureinfluss

Dausinger und Shen analysierten die Absorption von Laserstrahlung mit verschiedenen Wellenlängen in Eisen und Stählen [83]. Während die Absorption von CO_2 -Laserstrahlung in Eisen mit höheren Temperaturen zunimmt, nimmt das Absorptionsvermögen von $1\ \mu\text{m}$ Laserstrahlung mit steigenden Temperaturen ab. Von $0\ ^\circ\text{C}$ bis $800\ ^\circ\text{C}$ nimmt das Absorptionsvermögen um etwa $18\ \%^3$ ab und bleibt bei Temperaturen über $800\ ^\circ\text{C}$ annähernd konstant [83]. Dies wird bei numerischen Simulationen oft vernachlässigt. Um eine höhere Vorhersagegenauigkeit zu erreichen, nahmen beispielsweise Bielak et al. in ihren Simulationen von Biegeprozessen des Dualphasenstahls DP1000 eine lineare Zunahme der Absorption in einem Temperaturbereich von $350\ ^\circ\text{C}$ bis $500\ ^\circ\text{C}$ an [97].

Hipp et al. nutzten eine zweistufige Methode zur Bestimmung des Absorptionsverhaltens. Zuerst wurde während und nach eines Bestrahlungsversuchs das Temperaturprofil auf der Werkstückoberfläche gemessen, um anschließend mithilfe der Temperaturdaten in einer numerischen Simulation das Absorptionsverhalten der Oberfläche nachzubilden [98].

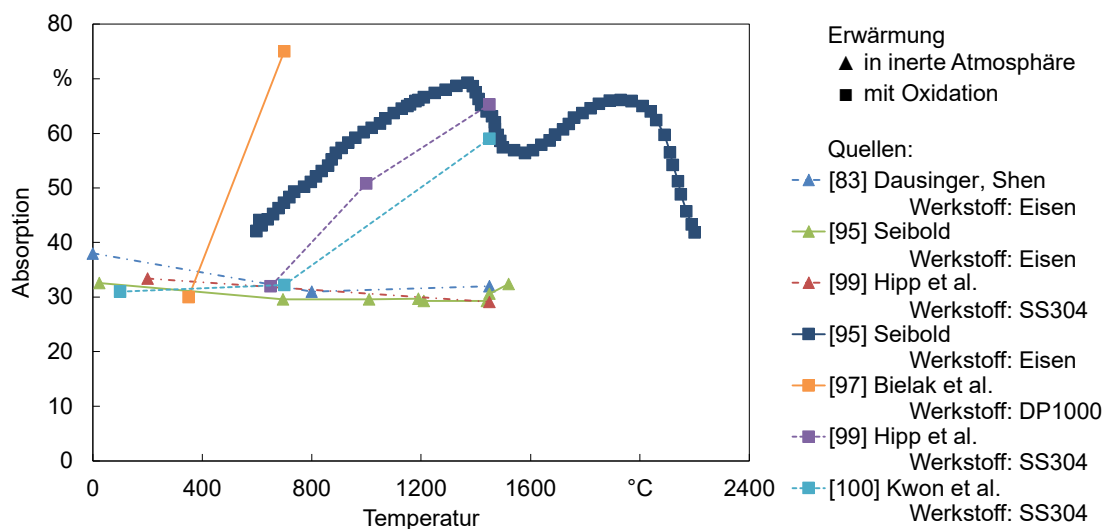
Mit diesem kombinierten Ansatz aus Temperaturmessung und Simulation konnte das Absorptionsverhalten von nichtrostendem Stahl X5CrNi18-10 für verschiedene Wellenlängen der Bestrahlungsquelle und über einen Temperaturbereich von $200\ ^\circ\text{C}$ bis zur Schmelztemperatur ermittelt werden [99]. Dabei wurden polierte Proben als Ausgangsmaterial verwendet. Die ermittelten Absorptionswerte zeigen eine geringe Temperaturabhängigkeit bei Versuchen unter Argonatmosphäre. Während die Absorption von Laserstrahlung mit einer Wellenlänge von $10.6\ \mu\text{m}$ über den gesamten Temperaturbereich konstant bleibt, zeigt sich eine abnehmende Tendenz mit höheren Temperaturen bei kleineren Wellenlängen, speziell $515\ \text{nm}$.

³ In einem Diagramm wird die Reduktion der Absorption von $38\ \%$ bei 0°C auf $31\ \%$ bei 800°C dargestellt.

In den Untersuchungen von Kwon et al. wurde ein vergleichbarer Anstieg der Absorptionswerte bei der Bestrahlung eines nichtrostenden Stahls an Atmosphäre bei Temperaturen oberhalb von 650 °C ermittelt [100].

Seibold untersuchte beispielhaft den Einfluss der Oxidation auf die Absorption durch die Erwärmung von zwei Eisenproben im beschriebenen reflektometrischen Aufbau mit einer Ulbrichtkugel (siehe Kapitel 2.2.2) [95]. Dabei wurde ein Anstieg der Absorption auf Werte zwischen 69 % und 73 % durch die Erwärmung ohne Schutzgas bis 1375 °C ermittelt. Bei weiterer Erwärmung auf 1570°C sinkt die Absorption wieder auf Werte zwischen 55 % und 65 %. Weiter steigenden Temperaturen auf bis zu 1920 °C resultieren in Absorptionswerten zwischen 69 % und 72 %. Eine Erhöhung auf 2200 °C führt zu Absorptionswerten von ungefähr 42 %, was der Autorin zufolge der Absorption einer oxidfreien Probe entspricht. [95]

Eine Übersicht der in der Literatur genannten Temperaturabhängigkeiten der Absorption von Stahl für Laserbestrahlungen mit einer Wellenlänge von 1 µm ist in **Bild 2.1** dargestellt.



Kügler 2022

Bild 2.1: Vergleich von in der Literatur beschriebenen Temperaturabhängigkeiten der Absorption von Laserstrahlung mit einer Wellenlänge von 1 µm

2.2.4 Topografieeinfluss

Die Topografie des Werkstücks beeinflusst zudem das Absorptionsvermögen. Auf makroskopischer Ebene kann durch die Bestrahlung einer Rille oder Nut der Fall auftreten, dass reflektierte Anteile der Laserstrahlung erneut auf das Werkstück treffen und es so zu einer Erhöhung der effektiven Absorption kommt. Beim Härten mit dem Laserstrahl

wurde ebendies beobachtet, jedoch auch festgestellt, dass die Effizienz des Prozesses nicht steigt, da die Ränder der bestrahlten Rille weniger effektiv gehärtet wurden [101].

Ueda et al. untersuchten den Temperaturgradientenmechanismus anhand von nichtrostenden Stahlblechen, wobei die Absorption von Oberflächen untersucht wurde, die durch Sandstrahlen mit unterschiedlichen Körnungen des Strahlguts vorbehandelt wurden [4]. Die Absorption wurde gemessen, indem die Probe in einer Ulbrichtkugel aus Kupfer platziert wurde. Die oxidfreie Kupferoberfläche hat den Autoren zufolge einen Reflexionsgrad von 98 %. Es wurden die Körnungen #60, #320 und #600 verwendet. Bei allen Vorbehandlungen wurde unabhängig von der Körnung eine Absorptionssteigerung der CO₂-Laserstrahlung von 12 % im Ausgangszustand auf mehr als 35 % festgestellt. Sowohl durch feinere als auch gröbere Körnung resultierten den Untersuchungen zufolge geringere Absorptionsgrade als bei einer Vorbehandlung mit der Körnung #320, bei der eine Absorption von 47 % gemessen wurde. [4]

Einen Rauheitseinfluss ermittelte auch Bergström in Untersuchungen der Laserstrahlabsorption verschiedener Stähle [92]. Mit dem in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Aufbau mit einer Ulbrichtkugel wurden drei Variationen des Werkstoffs „304SS“ untersucht: kaltgewalzt, warmgewalzt und blankgeglüht. Für den kaltgewalzten nichtrostenden Stahl wurde eine Absorption von 37.4 % ermittelt, wobei eine Oberflächenrauheit von $Sa = 0.29 \mu\text{m}$ angegeben wird. Der warmgewalzte Stahl hat den Untersuchungen zufolge eine rauere Oberfläche ($Sa = 3.26 \mu\text{m}$). Gleichzeitig wurde eine höhere Absorption von 57.5 % gemessen. Der blankgeglühte Stahl hat eine besonders niedrige Oberflächenrauheit von $Sa = 0.09 \mu\text{m}$. Die gemessene Absorption beträgt 32.4 %. Es ergibt sich somit ein Trend, dass die Absorption mit ansteigender Rauheit zunimmt. Dieser Trend konnte jedoch für Baustähle nicht bestätigt werden. [92]

Bergström zufolge kann der Anstieg der Absorption auf Oberflächenoxide, Oberflächenverunreinigungen, Oberflächenrauheit und das Vorhandensein von Legierungselementen zurückgeführt werden. Weiter wird betont, dass zusätzliche Untersuchungen notwendig sind, um die Einflüsse gezielt und isoliert voneinander zu untersuchen. [92]

Mit Hilfe einer Ray-tracing-Analyse in einer numerischen Simulation fand Bergström zudem heraus, dass Rauheitswerte wie Ra und Rq nicht für die Vorhersage von Absorptionswerten geeignet sind [92]. Die durchschnittliche Steigung des Oberflächenprofils (engl. *root mean square slope*) wurde als ein geeigneterer Indikator angesehen. Bei senkrechter Bestrahlung steigt das Absorptionsvermögen jedoch mit höheren Rauheitswerten, insbesondere bei stark reflektierenden Materialien. [92]

In den experimentellen Ergebnissen von Seibold wurde eine allgemeine Zunahme des Absorptionsvermögens bei höheren Rauheitswerten gemessen [95]. Es wurde jedoch ein

Absorptionsmaximum für Rz -Werte von 2 μm bis 4 μm festgestellt. Dieser Effekt wurde durch die Theorie von Agababov [102] erklärt, der den Effekt der Rauheit mit einem mathematischen Modell berechnete, in dem die Reflexionen einer Oberfläche proportional zum Quotienten aus einer glatten Oberfläche geteilt durch die Oberfläche der rauen Fläche sind. Daher sind die quadratischen Mittelwerte der Rauheit ungeeignet, da sie die Art der Rauheit, ihre Struktur oder ihre Verteilung nicht berücksichtigen [102].

Wen und Mudawar untersuchten den Einfluss der Oberflächenrauheit auf die Emissivität von Aluminiumlegierungen [103]. Die aufgestellten Modelle zeigen für eine Aluminiumlegierung („AL7075“) eine gute Übereinstimmung mit der Theorie von Agababov, wobei diese Übereinstimmung bei höheren Temperaturen zunahm. [103]

In einem numerischen Modell kann der Einfluss der Rauheit auf die vorliegenden Bestrahlungswinkel über eine Ray-tracing Methode nachvollzogen werden. Kaplan zeigte, dass die Rauheit einer Oberfläche die Homogenität der Strahlungsabsorption beeinflusst [104]. Durch eine modellierte Oberfläche mit Rauheitsspitzen mit einer Höhe von 20 μm werden bei geringen Einstrahlwinkeln von 5° bis zu 29.36 % der Oberfläche nicht bestrahlt, da diese im Schattenbereich zwischen den Rauheitsspitzen liegen und auch durch Mehrfachreflexionen nicht erreicht werden. [104]

Seibold stellt ebenfalls infrage, ob Rauheitswerte wie Ra und Rz für die Korrelation mit dem Absorptionsvermögen geeignet sind, da Proben mit gleichen Rauheitswerten, aber unterschiedlichen Absorptionswerten identifiziert wurden [95]. Daraus wurde der Schluss gezogen, dass Imperfektionen auf der Oberfläche einen signifikanten Einfluss zu haben scheinen. [95]

Darüber hinaus untersuchten Pantsar und Kujanpää die Absorption von Diodenlaserstrahlung an niedrig legiertem Stahl [105]. Es wurde festgestellt, dass die Tendenz besteht, dass das Absorptionsvermögen mit höheren Oberflächenrauheitswerten zunimmt. Zusätzlich wurde ermittelt, dass die Oxidation der Oberfläche des Materials den signifikantesten Einfluss auf das Gesamtabsorptionsvermögen hat. [105]

Untersuchungen von Hipp et al. zeigen, dass ein ausgeprägtes Brewster-Maximum nur für polierte Proben und Proben ohne mechanische Behandlung (engl. *as-received*, wie geliefert) zu ermitteln ist [106]. Geschliffene (K240) und sandgestrahlte Proben zeigen im Trend eine Absorptionserhöhung bei der Bestrahlung mit parallel polarisierter Laserstrahlung mit steigenden Einfallswinkeln, wobei ein Einfallswinkel von 0° den senkrechten Strahleinfall auf die Oberfläche beschreibt. Die Absorption senkrecht polarisierter Laserstrahlung unterscheidet sich deutlich vom Verhalten, welches durch die Fresnel-Absorption beschrieben wird. Bei geschliffenen Proben ist keine signifikante Absorptionsänderung bei der Variation des Einfallswinkels zu beobachten.

Bei sandgestrahlten Proben erhöht sich die Absorption mit steigendem Einfallswinkel, wohingegen bei einem Verhalten gemäß der Fresnel-Gleichungen die Absorption senkrecht polarisierter Laserstrahlung üblicherweise kontinuierlich sinkt. Dies wird damit erklärt, dass bei höheren Einfallswinkeln in Bezug auf die makroskopische Oberfläche der mikroskopische Einfallswinkel auf den Rauheitsspitzen kleiner ist. Die höheren Absorptionswerte bei höherer Oberflächenrauheit sind demnach rein geometrisch begründet. [106]

Zudem wurde beobachtet, dass die Absorptionswerte bei senkrechtem Strahleinfall für die verschiedenen Polarisierungen bei geschliffenen und sandgestrahlten Proben nicht gleich sind, was durch die Anisotropie der Oberflächenrauheit begründet wird. [106]

Die Autoren konnten zeigen, dass ein Rauheitskriterium existiert, für das das Absorptionsverhalten den Fresnel-Gleichungen folgt [106]. Dieses Kriterium lautet:

$$R_z = \frac{\lambda}{32} \quad (2.4)$$

Mit diesem Kriterium wird eine Oberfläche als glatt klassifiziert, wenn die Phasenverschiebung der elektromagnetischen Welle zwischen den Rauheitsspitzen und -tälern kleiner als $\pi/8$ ist. Bei raueren Oberflächen ist das Absorptionsmaximum geringer und zu kleineren Einfallswinkeln verschoben. [106]

Neben der makroskopisch durch die Rauheitswerte beschreibbaren Topografie können mikroskopische Oberflächenveränderungen durch Temperatureinwirkungen auftreten, die auf Oxidation zurückzuführen sind.

2.3 Oxidation nichtrostender Stähle

2.3.1 Oxidschichtbildung

Die Oberfläche von nichtrostenden Stahlblechen kann durch Oxidation, die durch Erwärmung unter sauerstoffhaltiger Atmosphäre hervorgerufen wird, sowohl optisch als auch in ihrer Funktionalität beeinflusst werden. Untersuchungen von McAdam und Geil zeigten den Einfluss von niedrigen Temperaturen bis 650 °C und Haltezeiten von 0.5 s bis zu 200 Tagen auf die Oxidation verschiedener Stähle [107]. Basierend auf den Zeit- und Temperaturparametern kann das Auftreten der Farben Strohgelb, Blau und Braun auf der Oberfläche vorhergesagt werden. Für den nichtrostenden Stahl 1.4301 ergaben Untersuchungen des Oxidationsprozesses, dass die Glühfarbe die Oxidschichtdicke darstellt [108]. Nach einer siebenminütigen Erwärmung bei 650 °C färbte sich die Oberfläche blau. Diese blaue Färbung wurde mit einer Dicke von 130 nm bis 140 nm assoziiert [109]. Die Farbgebung durch Oxidation kann auch zur kontrollierten Oberflächenkolorierung verwendet werden (z. B. [110]).

Bei Bestrahlungsversuchen von polierten Stahlproben des Werkstoffs 304L mit einem Puls laser (Pulslänge 120 ns) identifizierten Lawrence et al. einen geschichteten Aufbau der resultierenden Oxidschicht [111]. Mit einer durchschnittlichen Leistung von 5.6 W, einer Überlappung der Laserpfade von 83 %⁴ und einer Vorschubgeschwindigkeit von 47 mm/s wurde eine durchschnittliche Oxidschichtdicke von 405 nm erzeugt. In STEM-Untersuchungen konnte dabei eine besonders chrom- und manganreiche Oxidschicht nahe des Grundwerkstoffs ermittelt werden, welche von einer eher eisenreichen Oxidschicht an der Oberfläche überlagert wird. [111]

Eine zerstörungsfreie Messung der durch kurzzeitige Erwärmung hervorgerufenen Oxidschichtdicke ist aufgrund der zu erwartenden Dicke im Nanometerbereich herausfordernd. Deutlich größere Oxidschichtdicken zwischen 30 µm und 180 µm konnten per akustischer Resonanzmessung detektiert werden [112].

Vesel et al. untersuchten die Oxidschichtbildung beim Werkstoff AISI 304L bei Temperaturen bis 500 °C in einer künstlichen Atmosphäre mit atomarem Sauerstoff [113]. Der Dissoziationsgrad betrug 10 %. Es wurden Eisenoxide mit Schichtdicken von 7 nm bei Raumtemperatur bis zu 40 nm bei 450 °C ermittelt. In den Untersuchungen konnte keine Abhängigkeit der Oxidschichtdicke von der Versuchsdauer ermittelt werden. Die Reaktionszeit des Oxidschichtwachstums bis zum Erreichen eines Equilibriums muss daher unter der minimalen Versuchsdauer von einer Sekunde liegen. [113]

Weitere Untersuchungen in einer Luftplasmaatmosphäre mit einem Sauerstoffdissoziationsgrad von 70 % wurden für den Werkstoff AISI 316L von Vesel et al. durchgeführt [114]. In diesen Untersuchungen wurden hauptsächlich Eisenoxide bei Temperaturen bis 600 K identifiziert. Bei höheren Temperaturen entstand hauptsächlich Chromoxid. Ab einer Temperatur von 1000K wurde eine unregelmäßige Oxidschichtbildung mit einerseits hohen Chromanteilen und andererseits großen Oxidinseln identifiziert. Innerhalb dieser Inseln wurde besonders eisenhaltiger Spinell in Bereichen ansonsten geringer Eisenkonzentration entdeckt. Die Untersuchungen endeten bei 1250 K. [114]

Die Abhängigkeit der Oxidation vom Sauerstoffpartialdruck und der Temperatur wurde von Gulbransen und Andrew untersucht, wobei herausgefunden wurde, dass mit der Oxidation auch eine Gewichtszunahme einhergeht [115].

⁴ Es wurde ein fokussierter Laserstrahl mit annähernd gaußförmiger Intensitätsverteilung $1/e^2$ -Breite von 59 µm verwendet. Mehrere überlappende Laserstrahlscans wurden mit einem Schwerpunkt-zu-Schwerpunkt-Abstand von 10 µm erzeugt.

Smith untersuchte die Oxidation von nichtrostendem Stahl in einer CO₂-Atmosphäre im Temperaturbereich von 600 °C bis 985 °C, wobei verschiedene Oxide in der Oxidschicht nachgewiesen werden konnten [116]. Zudem wurde beobachtet, dass die Oxidationsrate, gemessen an der Gewichtszunahme, parabolisch verläuft, dennoch nicht über die gesamte Temperaturhaltezeit konstant ist. Es scheint zwei parabolische Wachstumsraten zu geben, wobei die größere Wachstumsrate zu Beginn des Oxidationsversuchs beobachtet wird. Dem Autor zufolge lassen sich die Unterschiede in der Wachstumsgeschwindigkeit mit der Entstehung einer „heilenden“ Schicht erklären, die an der Grenzfläche zwischen Oxid und Metall entsteht. Die Ergebnisse legen die Vermutung nahe, dass diese „heilende“ Oxidschicht ein chromhaltiger Spinell mit einer Zusammensetzung nahe der von FeCr₂O₄ ist. Die zuerst relativ hohe Wachstumsgeschwindigkeit wird mit der Verfügbarkeit von Chrom an den Korngrenzen erklärt. Die anschließend geringere Wachstumsgeschwindigkeit wird dadurch erklärt, dass die Diffusion von Chrom aus der Legierung einer niedrigeren Diffusionsgeschwindigkeit unterliegt [116].

Für die Oxidation des Werkstoffs AISI 304L in CO₂-Atmosphäre wurden von Goutier et al. drei aufeinanderfolgende Schritte identifiziert [117]. Im ersten Schritt bildet sich Cr₂O₃ und chromhaltiger Spinell der Art Fe²⁺Cr₂O₄ an den Korngrenzen. Im zweiten Schritt wächst parabolisch, jedoch verlangsamt im Vergleich zum ersten Schritt, eine Fe_{1-x}O-Schicht. Im dritten Schritt konnte wieder ein beschleunigtes Wachstum ermittelt werden, welches mit einer Ausbeulung der oberflächigen Oxidschicht einhergeht. Diese Ergebnisse bestätigen die Beobachtung unterschiedlicher Wachstumsgeschwindigkeiten von Smith [116], wobei jedoch ein unterschiedlicher schematischer Schichtaufbau durch Goutier et al. skizziert wird [117].

Allen et al. untersuchten das Oxidationsverhalten des Werkstoffs AISI 304L bei einer Erwärmung auf 600 K [118]. Im Ausgangszustand bei Raumtemperatur wurde die Oxidschicht analysiert und das Mischoxid Fe(Fe, Cr)₂O₄ identifiziert. Bereits Erwärmungszeiten von zwei Minuten führten zu einer erhöhten Eisenkonzentration in der äußeren Schicht. Diese Erhöhung wurde auf die vermehrte Präsenz von Fe₃O₄ an der Oberfläche zurückgeführt. Die größere Beweglichkeit und Diffusionsgeschwindigkeit der Eisenionen in der vorhandenen Oxidschicht wurde als ursächlich für die Entstehung eines Konzentrationsgradientens innerhalb der Oxidschicht und die Bildung einer Duplexstruktur angesehen. [118]

Gosh et al. fanden hingegen heraus, dass das Oxidationsverhalten beim Werkstoff AISI 304L durch die Ausgangsoberfläche beeinflusst wird [119]. Polierte und geschliffene Oberflächen bildeten bei einer Erwärmung auf 300 °C für 360 Stunden Oxidschichten mit einem höheren Chromgehalt. Lösungsgeglühte Proben zeigten zudem dickere Oxidschichten bei gleicher Erwärmungsdauer.

Untersuchungen von Fujikawa und Iijima zeigten, dass auch die Korngröße des erwärmten Werkstoffs einen Einfluss auf das Oxidationsgeschehen hat [120]. Bei Experimenten mit dem Werkstoff „316“⁵ wurde das Oxidationsverhalten nach 100 Stunden an Atmosphäre bei 700 °C, 850 °C und 1000 °C untersucht. In allen Fällen steigt die Massenzunahme infolge der Oxidation mit der Korngröße an. Dieser Effekt ist bei niedriger Temperatur ausgeprägter, da den Autoren zufolge bei hohen Temperaturen gleichzeitig eine Kornvergrößerung auftritt. Eine Aussage über kurzzeitige Temperatureinwirkung lässt sich aus der Studie nicht ableiten. [120]

Das Oxidationsverhalten der Stähle AISI 304 und AISI 316 wurde von Guillet et al. im Temperaturbereich 900 °C bis 1100 °C untersucht [121]. Dabei konnten jeweils die Oxidschichtbestandteile Fe_2O_3 und Cr_2O_3 identifiziert werden. Bei zuvor polierten Proben wurden vermehrt chromhaltige Oxide gefunden, während bei einer mit einer HCl/HNO_3 -Mischung chemisch gereinigten Proben verstärkt das Oxid Fe_2O_3 gefunden wurde. [121]

In den Untersuchungen von Smith wurde kein Unterschied zwischen geschliffenen Proben und Proben im Ausgangszustand bezüglich der Gewichtszunahme durch Oxidation bei der Erwärmung eines Stahls mit einem Chromanteil von 18 % und einem Nickelanteil von 8 % in einer CO_2 -Atmosphäre festgestellt [116].

Cui et al. untersuchten die Bestrahlung eines nichtrostenden Stahls AISI 304 mit Laserstrahlungspulsen ($\lambda = 1.064 \mu\text{m}$) [122]. Dabei konnte die Bildung der Oxide Cr_2O_3 , Fe_2O_3 und geringe Anteile von MnO_2 gefunden werden. Die Autoren beschreiben, dass beim Oxidationsprozess zuerst Cr_2O_3 gebildet wird, da Chrom die größere Sauerstoffaffinität aufweist. Durch die höhere Mobilität der Eisenionen bzw. -atome wird bei hohen Temperaturen ein Diffusionsprozess ermöglicht, wodurch das Oxid Fe_2O_3 im Zentrum eines Laserbestrahlungsflecks gebildet wird, da hier die Temperatur am höchsten ist. In weiteren Untersuchungen zeigten Cui et al., dass die mit Cr_2O_3 bedeckten äußeren Bereiche der Laserbestrahlungsflecken eine höhere Korrosionsbeständigkeit aufweisen als die inneren Bereiche, in denen Fe_2O_3 gebildet wurde [123].

Charakteristische Strukturen wurden bei der Analyse eines 96-stündigen Oxidationsprozesses bei 800 °C beim nichtrostenden Stahl X5CrNi18-10 von Sabioni et al. beobachtet [124]. Die dort beschriebenen Oberflächenstrukturen haben wahrscheinlich aufgrund der langen Prozessdauer eine Größe von wenigen Mikrometern erlangt. In den Untersu-

⁵ Es wird angenommen, dass der Werkstoff SUS 316 gemeint ist. Präzisere Angaben werden nicht gemacht, jedoch stimmt die aufgelistete chemische Zusammensetzung mit dem Werkstoff SUS 316 überein.

chungen von Vesel et al. wurde die Veränderung der Oberflächentopografie in Abhängigkeit der Temperatureinwirkung in einem Luftplasma dargestellt [114]. Bei einer Temperatureinwirkung von 600 K für 5 Minuten wurden zunächst einzelne Oxidpartikel detektiert. Bei einer Temperatur von 800 K war bereits die gesamte Oberfläche bedeckt. Eine weitere Temperatursteigerung führte jedoch nicht zur Bildung einer homogenen Fläche, sondern zu einer Vergrößerung der Partikel und der Bildung von Agglomerationen. [114]

Der von Sabioni et al. [124] ermittelte Arrheniusgraph für die Diffusionskoeffizienten einer Diffusion von Sauerstoffionen in Oxidschichten des Werkstoffs AISI 304 stimmt mit den Ergebnissen von Tsai et al. [125] größtenteils überein. Lediglich die effektive Diffusion bei einer Temperatur von 900 °C wird von Tsai et al. ca. 7 % geringer angegeben, allerdings wurde in dieser Untersuchung ein anderer Werkstoff ($\text{Ni}_{70}\text{Cr}_{30}$) verwendet [125]. Die dennoch gegebene Übereinstimmung wird von Sabioni et al. [124] damit erklärt, dass die Oxidschicht des Stahls AISI 304 gemäß den Untersuchungen von Huntz et al. [126] bei den verwendeten Temperaturen hauptsächlich aus Cr_2O_3 besteht und dieses Oxid auch bei den Untersuchungen am Nickelwerkstoff von Tsai et al. auftritt [125]. Der Arrheniusgraph für die parabolischen Oxidationskonstanten einer Oxidation des nichtrostenden Stahls AISI 304 an Luft zeigt Abweichungen von theoretisch und experimentell ermittelten Daten von weniger als 3 % zueinander [124].

Aus den von Sabioni et al. ermittelten Daten kann der effektive Diffusionskoeffizient D_{eff} der Sauerstoffdiffusion in einer Oxidschicht des Werkstoffs AISI 304 als Funktion der Temperatur ausgedrückt werden [124]. Dies ist in **Bild 2.2** dargestellt.

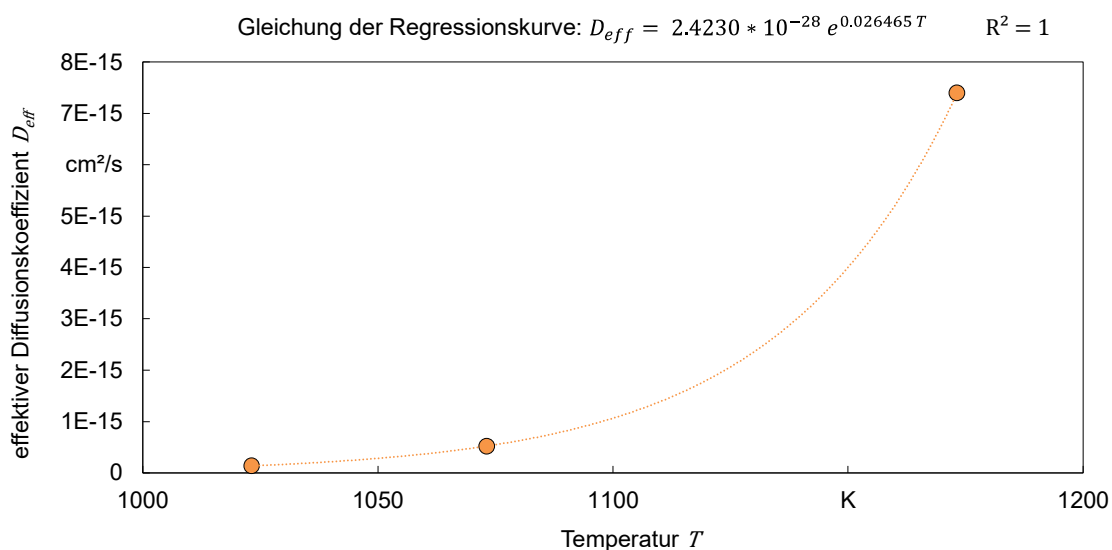


Bild 2.2: Darstellung der Abhängigkeit des effektiven Diffusionskoeffizienten der Sauerstoffdiffusion in eine Oxidschicht des Werkstoffs AISI 304 von der Temperatur basierend auf den Daten von Sabioni et al. [124].

Huntz et al. [126] untersuchten das Oxidationsverhalten der nichtrostenden Stähle AISI 304 und AISI 439 bei verschiedenen Umgebungsmedien. Für den Werkstoff AISI 304 wurde ein zweistufiges Oxidationsverhalten an Luft beobachtet. Für Temperaturen bis 850 °C wurde ein parabolisches Wachstumsverhalten der Oxidschicht ermittelt, was dem Oxid Cr_2O_3 zugeordnet wurde. Bei höheren Temperaturen ergeben sich Abweichungen zu einer erhöhten Wachstumsgeschwindigkeit durch die zusätzliche Bildung von Eisenoxid. [126]

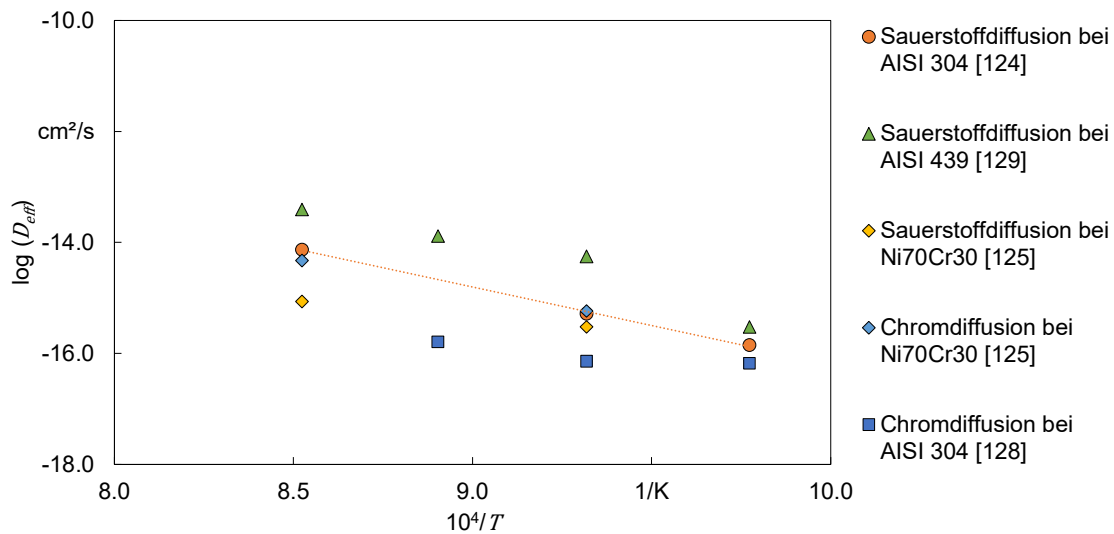
Die von Huntz et al. [126] ermittelten Daten wurden in einem Arrheniusgraphen dargestellt, woraus die Aktivierungsenergie des Oxidationsvorgangs aus der Steigung der Regressionsgeraden extrahiert werden kann, die sich bei der Darstellung der parabolischen Oxidationskonstanten k_p über den Kehrwert der Temperatur ergibt. Für die Oxidation an Luft im Temperaturbereich von 850 °C bis 950 °C konnte für den Werkstoff AISI 304 eine Aktivierungsenergie von 213 kJ/mol⁶ ermittelt werden, was dem Oxid Cr_2O_3 zugeordnet wird. [126]

In Oxidationsversuchen am Werkstoff AISI 304 in einer synthetischen Luftatmosphäre bei Temperaturen zwischen 1100 °C und 1200 °C wurden von Carvallho et al. eine Aktivierungsenergie von 226 kJ/mol ermittelt [127].

In weiteren Untersuchungen zeigten Sabioni et al., dass die Diffusion von Chrom bei der Cr_2O_3 -Oxidschichtbildung des Stahls AISI 304 langsamer abläuft als die Sauerstoffdiffusion [128].

Für einen ferritischen Chromstahl (AISI 439) konnten von Sabioni et al. ebenfalls die effektiven Diffusionskoeffizienten für die Entstehung von Cr_2O_3 ermittelt werden [129]. Ein Vergleich der in der Literatur genannten temperaturabhängigen effektiven Diffusionskoeffizienten bei der Cr_2O_3 -Oxidschichtbildung ist in **Bild 2.3** dargestellt.

⁶ In der Veröffentlichung werden sowohl die Rohdaten (Tabelle 5), die Graphen (Bild 10), als auch die daraus abgeleiteten Aktivierungsenergien (Tabelle 6) dargestellt. Für die Oxidation an Luft wird in Tabelle 6 sowohl für den Werkstoff AISI 304 als auch für AISI 439 eine Aktivierungsenergie von 231 kJ/mol genannt. Sowohl graphisch (in Bild 10) als auch algebraisch (mit den Werten aus Tabelle 5) ergibt sich für den Werkstoff AISI 304 jedoch eine Aktivierungsenergie von 213 kJ/mol. Für den Werkstoff AISI 439 ergibt sich eine Aktivierungsenergie von 231 kJ/mol. Es wird daher von einem Tippfehler in der Veröffentlichung ausgegangen und der Wert 213 kJ/mol für die Oxidation des Werkstoff AISI 304 an Luft verwendet.



Kügler 2022

Bild 2.3: Darstellung der in der Literatur genannten effektiven Diffusionskoeffizienten verschiedener Ionen zur Cr_2O_3 -Oxidschichtbildung bei verschiedenen Werkstoffen in Abhängigkeit der Temperatur

Duley et al. erkannten, dass die Oxidation eines nichtrostenden Stahls AISI 304 einem parabolischem Gesetz folgt und damit auch eine Absorptionsänderung bei einer Laserbestrahlung einhergeht [130].

Untersuchungen von Diffusionsprozessen des Stahls „T316“ im Vakuum von Hales deuten jedoch auf die Bildung einer Heilungsschicht an den Korngrenzen hin, die bei der Oxidschichtbildung zu einer Abweichung vom parabolischen Wachstumsgesetz führt [131]. Dies ist umso ausgeprägter, je höher der Chromgehalt und die Glühzeiten sind; bei einer Temperatur von 700 °C und einer Haltezeit von bis zu 30 Minuten wurde in den Untersuchungen keine Abweichung vom parabolischen Gesetz gemessen [131]. Bei einem Chromgehalt von 18 % wurde hingegen eine Sättigung der Gewichtszunahme nach 2000 Stunden erreicht. Die aus dem Arrheniusgraphen ermittelte Aktivierungsenergie ist mit 155 ± 12 kJ/mol [131] geringer als die von Huntz et al. für den Werkstoff AISI 304 ermittelte (213 kJ/mol) [126]. Zudem wurden die Untersuchungen bei niedrigeren Temperaturen durchgeführt (550 °C bis 765 °C) [131] als bei Huntz et al. (850 °C bis 900 °C) [126].

Von Saito et al. wurde festgestellt, dass die Oxidationsrate eines nichtrostenden Stahls von der Korngröße abhängt, wobei feinere Körner eine höhere Oxidationsrate aufweisen [132].

2.3.2 Absorptionsveränderungen durch Oxidation

Durch die Oxidation von Stahl wird die Absorptionsfähigkeit der Oberfläche verändert. Für Untersuchungen zu Laserstrahlbiegeprozessen werden Oberflächen für die Laser-

strahlerwärmung daher häufig mit Graphit beschichtet, um eine über den Prozessverlauf konstante Absorption zu erreichen (z.B. [27]). Diese Methode der Absorptionsbeeinflussung wurde für Bestrahlungen mit verschiedenen Wellenlängen, sowohl eines CO₂-Lasers als auch eines Nd:YAG-Lasers, bereits von Sainte-Catherine et al. beschrieben [133].

Der Effekt der Oxidation wurde bei Versuchen von Hipp et al. am Werkstoff AISI 304 mit einer Laserwellenlänge von 1.07 µm an Luft ermittelt [99]. Dies wurde durch die Kombination aus Temperaturmessungen auf der Rückseite des bestrahlten Blechs und einer numerischen Simulation ermittelt. Es zeigt sich, dass oberhalb einer Temperatur von 650 °C bis zur Schmelztemperatur die Absorptionswerte auf bis zu 65 % anstiegen. Bei den Versuchen mit Schutzgas betrug die Absorption unabhängig von der Temperatur weniger als 30 %. Die Absorptionssteigerung wird auf die Oxidation des bestrahlten Materials zurückgeführt. [99]

Untersuchungen von Kwon et al. zur Laserbestrahlung verschiedener Materialien (Aluminium, nichtrostender Stahl SS304 und Titan) bestätigen einen Anstieg der Absorptionswerte bei der Bestrahlung eines nichtrostenden Stahls an Atmosphäre mit einer Wellenlänge von 1.07 µm bei Temperaturen oberhalb von 650 °C [100].

Karlsson und Ribbing beschreiben, dass bei austenitischen Stählen eine höhere Reflexion gemessen wurde als bei ferritischen und martensitischen Stählen [134]. Zudem wurden die beiden natürlich vorkommenden Oxide Fe₂O₃ und Cr₂O₃ auf ihre optischen Eigenschaften untersucht und deren optischen Konstanten wellenlängenabhängig ermittelt. Aus diesen optischen Konstanten können die Absorptionswerte von 79.2 % für Fe₂O₃ und 86.8 % für Cr₂O₃ mit den Formeln aus Gleichung (2.2) und Gleichung (2.3) berechnet werden (siehe Seite 16).

Abedi und Gollo [96] stellten definierte Cr₂O₃-Schichtdicken mit einem Sol-Gel-Beschichtungsprozess her, um die Auswirkungen der Rauheit und Cr₂O₃-Schichtdicke auf das Absorptionsvermögen und die resultierenden Biegewinkel beim Laserstrahlbiegen eines nichtrostenden Stahlblechs (AISI 304) zu ermitteln. Die Schichtdicke betrug 2 µm, 4 µm oder 6 µm und wurde mit einem optischen Messverfahren bestimmt. Die Absorptionsmessung wurde mit einem Spektrometer durchgeführt. Generell wurden geringere Reflexionswerte bei höheren Rauheiten und größeren Schichtdicken gemessen. Unabhängig von der Cr₂O₃-Schichtdicke ermitteln die Autoren für Proben einer besonders rauen Oberfläche ($Ra = 1.9 \mu m$) eine maximale Absorption zwischen 90 % und 91 %. Für glattere Proben ($Ra = 0.7 \mu m$) wurden Absorptionsgrade zwischen 83.72 % und 86.76 % gemessen. Einen signifikanten Einfluss der Oxidschichtdicke konnte nur bei Proben der geringsten Rauheit ermittelt werden ($Ra =$

0.04 μm). Dort wurde eine Absorptionssteigerung von 37.26 % (ohne Oxidschicht) auf 68.63 % (für eine Oxidschichtdicke von 6 μm) gemessen. [96]

Für das Oxid Cr_2O_3 wurden Untersuchungen der optischen Eigenschaften an Sputtertargets durchgeführt [135]. Aus diesen Werten konnte ein Absorptionswert von 81.9 % ermittelt werden [99]. Für durch Verdampfung abgeschiedene Schichten ergeben sich optische Koeffizienten, aus denen ein Absorptionswert von 85.2 % für eine Laserbestrahlung mit einer Wellenlänge von 1030 nm resultiert [136].

Die optischen Eigenschaften verschiedener Materialien, unter anderem Fe_2O_3 , wurde von Query untersucht [137]. Aus den darin aufgeführten Konstanten lässt sich eine Absorption von 86.15 %⁷ bei einer Bestrahlung mit einer Wellenlänge von 1030 nm unter einem Einfallswinkel von 0° bestimmen.

⁷ Die Messwerte für die Bestrahlung mit senkrechter und paralleler Polarisation wurden gemittelt. Dadurch ergeben sich die Werte $n = 2.185$ und $k = 0.043$. Die Berechnung des Absorptionsgrads anhand dieser Werte ist in Kapitel 2.2.1 beschrieben.

2.4 Fazit

Diverse Produktionsprozesse nutzen eine mehrfache Laserstrahlerwärmung, sei es als Hauptenergiequelle wie beim Laserstrahlbiegen oder als Möglichkeit der lokalen Temperaturerhöhung wie beim inkrementellen Umformen. Der Laserstrahl stellt ein geeignetes Werkzeug dar, die Temperaturerhöhung effizient auf den geforderten Werkstückbereich zu begrenzen. Die Temperaturen des Werkstücks sind dabei ein entscheidender Parameter für das Prozessergebnis.

Die Werkstücktemperaturerhöhung durch eine Laserstrahlbearbeitung ist maßgeblich abhängig vom Absorptionsgrad der Oberfläche. Dieser kann durch die Oberflächenstruktur und -zusammensetzung beeinflusst werden.

Die Auswirkungen von Oberflächenbeschaffenheiten auf das Absorptionsvermögen einer Stahloberfläche sind ausführlich untersucht worden. Auch die Oberflächenmodifikationen durch definierte Temperatureinwirkungen sind grundsätzlich bekannt. Die Auswirkungen kurzzeitig wirkender Oberflächenerwärmungen, die zudem mehrfach auftreten können, wie es bei Laserstrahlbearbeitungsprozessen möglich ist, sind jedoch nur unzureichend erforscht. Zudem werden Veränderungen der Oberfläche und damit der Absorption während des Prozesses bislang unzureichend berücksichtigt.

Die durch die Temperatureinwirkung hervorgerufene Bildung einer Oxidschicht, die ebenfalls einen Einfluss auf die Absorption des Werkstücks haben kann, ist sowohl von der Oberflächenstruktur als auch der Korngröße des Werkstoffs abhängig und ist daher nur schwer vorherzusagen. Darüber hinaus bilden sich beim nichtrostenden Stahl der Sorte 1.4301 oder Vergleichbarem, je nach Temperaturregime, unterschiedliche Oxide.

Sowohl numerische als auch analytische Berechnungen des Prozessergebnisses, wie die des Biegewinkels beim thermischen Biegen mit dem Laserstrahl, sind direkt abhängig vom Absorptionsgrad des Werkstücks. Eine Vielzahl an Publikationen nutzt individuelle Festlegungen, Literaturwerte oder erwähnt den verwendeten Absorptionsgrad nicht. Eine gängige Methode ist, die Berechnungsergebnisse anhand eines experimentellen Vergleichs zu validieren. Der Absorptionsgrad wird dabei dem experimentellen Ergebnis angepasst, ohne dass potenzielle Veränderungen der Absorption während des Prozesses berücksichtigt werden. Insbesondere die Skalierbarkeit bei Mehrfachbestrahlungen kann damit nicht gewährleistet werden.

3 Zielsetzung

Die thermische Auswirkung einer Laserstrahlbestrahlung unterhalb des Schmelzpunkts kann simuliert werden, wobei der Absorptionsgrad der Werkstückoberfläche als Eingangspareter vorgegeben werden muss. Die Absorption verschiedener Werkstoffe ist prinzipiell bekannt, allerdings kann diese durch Oberflächeneigenschaften des Werkstücks variieren. Die Oberflächeneigenschaften werden dabei nicht nur durch die zuvor mechanisch erfolgte Bearbeitung beeinflusst, sondern auch durch die zuvor wirkenden Temperatureinwirkungen. Dieser Einfluss wird bisher nicht ausreichend berücksichtigt.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, die Vorhersagbarkeit der Auswirkung von Laserstrahlerwärmungen eines Werkstücks auf Temperaturen unterhalb des Schmelzpunkts auf die Absorptionsänderung zu ermöglichen. Durch eine genauere Kenntnis der Absorptionsänderung soll die Genauigkeit und Skalierbarkeit numerischer Simulationen thermischer Bearbeitungsprozesse, wie z.B. das thermische Umformen von Blechen und Bauteilen, die Verzugkompensation, sowie das laserunterstützte mechanische Umformen, verbessert werden.

Es wird die Arbeitshypothese verfolgt, dass durch Laserbestrahlung hervorgerufene Absorptionsänderungen in Abhängigkeit der initialen Oberflächenbeschaffenheit berechnet werden können. Für den Nachweis sind Erkenntnisse aus Untersuchungen der Einflüsse verschiedener thermischer und mechanischer Oberflächenbearbeitungen erforderlich.

Dafür ist eine gegebenenfalls auftretende Oberflächenmodifikation zu identifizieren. Über unterschiedliche Laserbestrahlungen sollen Temperaturen unterhalb des Schmelzpunkts für variierende Zeitspannen am Beispiel einer nichtrostenden Stahloberfläche realisiert und unter Zuhilfenahme der Pre- und Postcharakterisierung der Oberflächenbeschaffenheit, welche aus Absorptions- und Rauheitsmessungen bestehen, ein Zusammenhang zum Absorptionsgrad identifiziert werden. Zur Zielerreichung werden die Absorptionsänderung infolge einer Temperatureinwirkung an Oberflächen mit unterschiedlichen mechanischen Bearbeitungszuständen (gefräst, geschliffen, poliert, unbehandelt) untersucht. Für die Vergleichbarkeit der Erwärmungen mit verschiedenen Zeit-Temperatur-Verläufen ist ein geeigneter Kennwert zu definieren. Mehrfache Laserbestrahlung wird zudem mit Proben verglichen, die einer flächigen Temperatureinwirkung ausgesetzt werden. Darüber hinaus ist zu prüfen, inwiefern eine Oxidation der Oberfläche infolge der Laserbestrahlung zu einer Modifikation der Absorptionseigenschaften führt.

Die Auswirkungen der Berücksichtigung einer prozessabhängigen Absorptionsänderung bei der mehrfachen Laserbestrahlung sollen anhand einer numerischen Simulation eines Laserstrahlbiegeprozesses verdeutlicht werden.

4 Materialien und Methoden

4.1 Werkstoffe

Für die experimentellen Untersuchungen wurden Bleche aus rostfreiem Stahl (Werkstoffnummer 1.4301) verwendet. Die Normwerte der chemischen Zusammensetzung gemäß DIN EN 10088-3 des verwendeten Materials sind in **Tabelle 4.1** aufgeführt.

Tabelle 4.1: Materialzusammensetzungen in Prozent

MATERIAL		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
1.4301	min.						17.5	8.0	
	max.	0.07	1.00	2.00	0.045	0.030	19.5	10.5	0.10

Das Material wurde für die Experimente in Proben geschnitten und initial vermessen. Die Ausgangswerte der Proben im Hinblick auf Geometrie, Oberflächenkennwerte und Absorptionsvermögen sind in **Tabelle 4.2** dargestellt.

Tabelle 4.2: Geometrien, Oberflächenkennwerte und Absorptionsvermögen der verwendeten Materialien im Ausgangszustand

MATERIAL	LÄNGE BREITE DICKE mm mm mm	INITIALE OBERFLÄCHENKENNWERTE					ABSORPTION
		S_a	S_q	S_z	S_{dq}	S_{top}	A^8
		μm	μm	μm	-	-	%
1.4301	76 50 0.6	0.52 ± 0.03	0.69 ± 0.04	11.53 ± 1.40	2.13 ± 0.07	3.53 ± 0.14	41.5 ± 1.5
1.4301	76 50 1.5	0.65 ± 0.03	0.85 ± 0.04	13.17 ± 0.81	2.55 ± 0.05	4.62 ± 0.18	37.7 ± 0.3
1.4301 (Charge 1)	76 50 3.0	0.84 ± 0.09	1.08 ± 0.13	15.78 ± 2.94	2.81 ± 0.14	5.47 ± 0.26	49.2 ± 3.9
1.4301 (Charge 2)	76 50 3.0	0.37 ± 0.13	0.52 ± 0.18	6.30 ± 1.42	0.80 ± 0.28	1.41 ± 0.16	40.1 ± 0.8

⁸ Die im Zusammenhang dieser Arbeit genannten Absorptionswerte beziehen sich stets auf die von den verwendeten Laserstrahlquellen emittierte Wellenlänge von 1030 nm.

4.2 Versuchsdurchführung

4.2.1 Punktuelle temperaturgeregelte Werkstoffwärmung

Zur Realisierung unterschiedlicher geregelter Zeit-Temperatur-Verläufe wurde eine Laserstrahlbearbeitung in Kombination mit einer berührungslosen Temperaturmessung verwendet. Die eingesetzte Laserstrahlquelle der Firma Trumpf, Typ TruDisk 12002, ist ein Multi-mode Yb:YAG (Ytterbium-dotierter: Yttrium-Aluminium-Granat) Laser mit einer Scheibe als laseraktivem Medium. Die emittierte Wellenlänge beträgt 1030 nm. Der Laserstrahl wurde durch ein Glasfaserkabel mit einem Faserkerndurchmesser von 200 μm zu einer Bearbeitungsoptik geführt. Die verwendete Optik ist in **Bild 4.1** dargestellt. Die Kollimationslänge dieser Optik beträgt 200 mm und die Brennweite 300 mm. Durch eine Defokussierung des Laserstrahls um 50 mm, wodurch der Fokus oberhalb der Werkstückoberfläche lag, ergab sich auf dem Werkstück ein Bestrahlungsbereich mit einem Durchmesser von 6.3 mm. Die Laserenergie wurde in Form von Laserstrahlpulsen mit einer festen Leistung von 500 W und einer Dauer von 6 ms bereitgestellt. Die Frequenz der Laserstrahlpulse wurde als Stellgröße des Regelkreises verwendet und auf maximal 100 Hz limitiert.

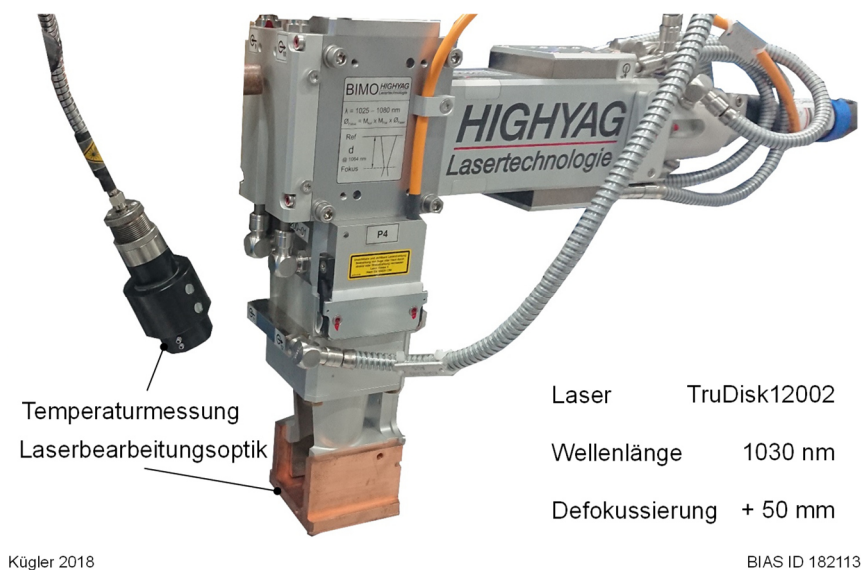


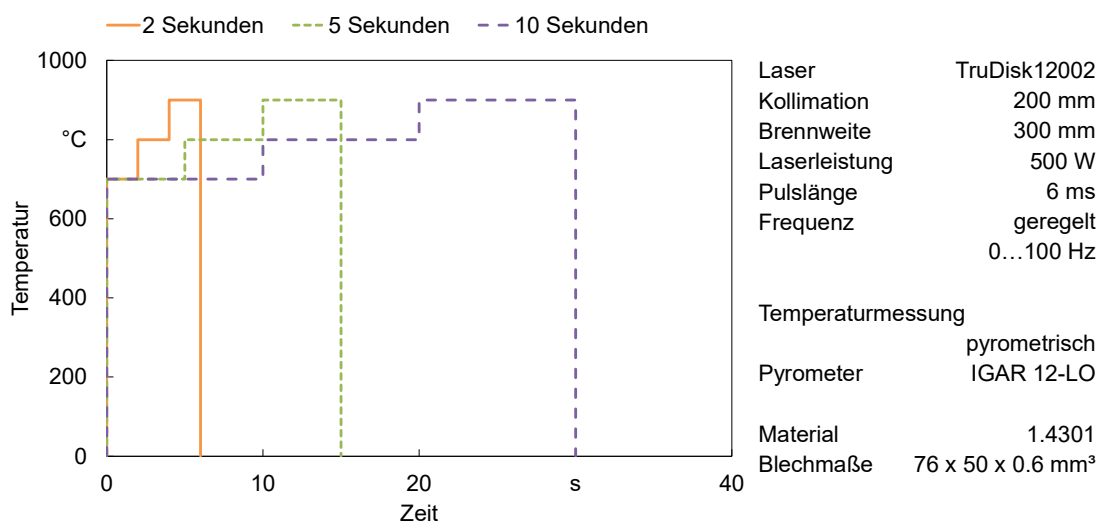
Bild 4.1: Aufbau für temperaturgeregelte Laserbestrahlung

Für die Erfassung der Oberflächentemperatur wurde ein Quotientenpyrometer LumaSense IMPAC IGAR 12-LO eingesetzt. Die ermittelte Temperatur wurde an einen PID-Regler als analoger Stromwert im Bereich 0 mA bis 20 mA übertragen. Die Daten wurden einem LabVIEW-basierten Regler mit einer Messfrequenz von 20 Hz verarbeitet.

Für die Experimente mit temperaturgeregelter Werkstoffwärmung wurden sowohl Bleche der Materialcharge 1 als auch der Materialcharge 2 verwendet (siehe

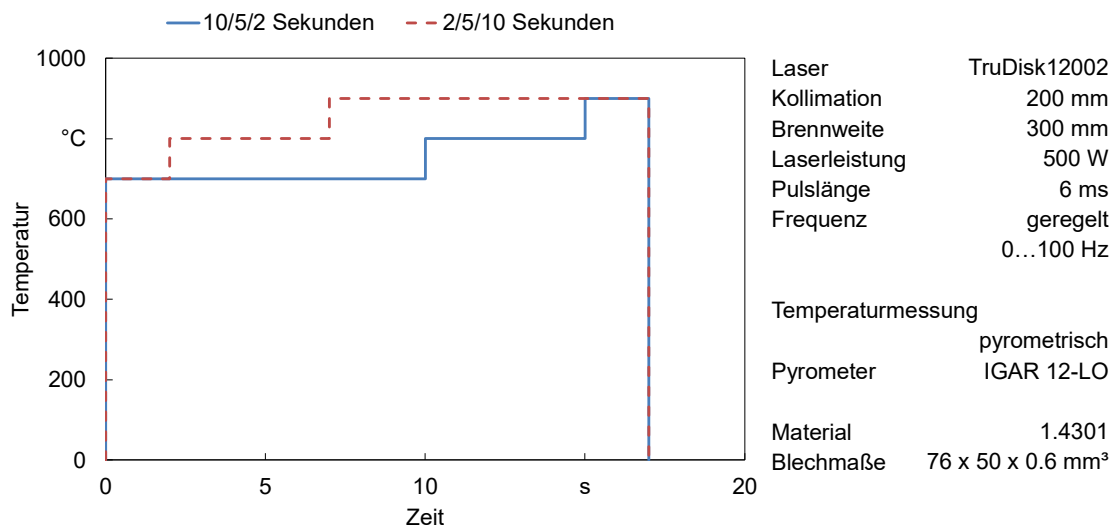
Tabelle 4.2). Eine Unterscheidung ist in den Ergebnissen anhand der Probenvorbehandlung oder der eindeutigen Nennung der Materialcharge gewährleistet.

Es wurden mehrere Zeit-Temperatur-Kurven realisiert, um die Auswirkungen sowohl verschiedener Temperaturen als auch Haltezeiten auf die Absorption der Blechoberfläche zu untersuchen. Die Laserstrahlbearbeitung wurde mit variierenden Temperaturzielwerten von 700 °C bis 1200 °C durchgeführt. Die Dauer der Laserstrahlerwärmung wurde zwischen 2 Sekunden und 34 Sekunden variiert. Zusätzlich wurde für jede Zieltemperatur eine Aufheizzeit von 2 Sekunden angewendet. Außerdem wurden Temperaturintervalle (700 °C → 800 °C → 900 °C) mit konstanten (je 2 s, 5 s, 10 s) sowie unterschiedlichen Zeitschritten (z.B. 2 s → 5 s → 10 s) untersucht. Die schematischen Darstellungen in **Bild 4.2** (für konstante Zeitschritte) und **Bild 4.3** (für unterschiedliche Zeitschritte) zeigen die Temperaturverläufe der eingestellten Temperaturintervalle.



Kügler 2022

Bild 4.2: Schematische Darstellung des Temperaturprofils für den Sollwert der punktuellen temperaturgeregelten Werkstoffwärmung mit Temperaturintervallen konstanter Zeitschritte



Kügler 2022

Bild 4.3: Schematische Darstellung des Temperaturprofils für den Sollwert der punktuellen temperaturgeregelten Werkstoffwärmung mit Temperaturintervallen unterschiedlicher Zeitschritte

Jeder Parametersatz wurde dreimal durchgeführt. Die Versuche wurden bei Umgebungstemperatur und ohne Schutzgas durchgeführt.

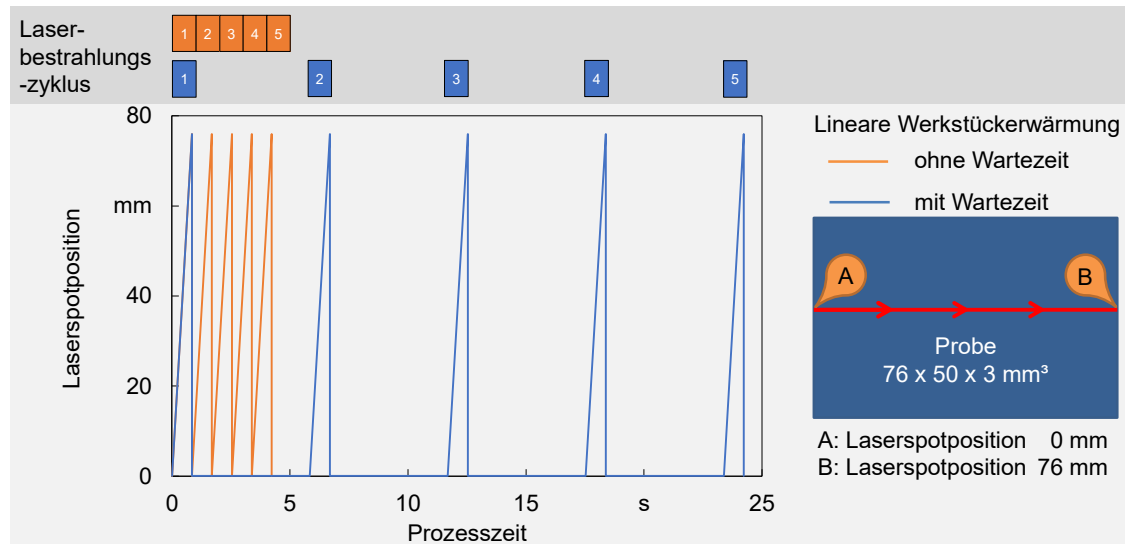
4.2.2 Lineare Werkstoffwärmung durch Laserbestrahlung

Für die mehrfach lineare Laserbestrahlung wurde ebenfalls ein Scheibenlaser (Trumpf TruDisk 12002) und zusätzlich eine programmierbare Fokussieroptik (PFO 3D mit einer Brennweite von 450 mm) eingesetzt (**Bild 4.5**, links). Die Versuche wurden mit einem 50 mm defokussierten Laserstrahl durchgeführt. Eine Spotgröße von 3.1 mm wurde bei einer Vermessung mit einem PRIMES FocusMonitor ermittelt. Die Laserleistung wurde für alle Versuche mit linearer Erwärmung auf 250 W festgelegt mit einer zusätzlichen linearen Rampe von 0.5 mm am Anfang und am Ende des Blechs, um eine Überhitzung an den Kanten zu vermeiden. Die Verfahrensgeschwindigkeit des Laserstrahls wurde auf 90 mm/s eingestellt.

Für die Experimente mit linearer Werkstoffwärmung wurden Bleche mit einer Dicke von 0.6 mm eingesetzt (siehe **Tabelle 4.2**).

Die Laserbearbeitung wurde mit einer variierenden Anzahl Bestrahlungszyklen durchgeführt, um unterschiedliche Temperaturbehandlungen der Stahlblechoberfläche zu erzeugen. Die gewählte Anzahl der Zyklen betrug 1, 2, 5, 10, 25, 50, 75 und 100. Diese Laserbestrahlungszyklen wurden in zwei Modi ausgeführt. Im ersten Modus begann jeder neue Laserbearbeitungszyklus direkt nach dem vorherigen. Im zweiten Modus wurde nach jedem Zyklus eine Wartezeit von 5 Sekunden implementiert, bevor der nächste Laserbearbeitungszyklus startete. Der Weg-Zeit-Verlauf dieser zwei Modi ist exemplarisch in **Bild 4.4** am Beispiel von 5 Bestrahlungszyklen dargestellt.

Jeder Parametersatz wurde dreimal ausgeführt, um Mittelwerte und Standardabweichungen zu jedem Parametersatz ermitteln zu können. Die Versuche wurden bei Umgebungstemperatur und ohne Schutzgas durchgeführt.



Kügler 2022

Bild 4.4: Schematische Darstellung des Weg-Zeit-Verlaufs für eine lineare Werkstoffwärmerung mit (blau) und ohne (orange) Wartezeit nach jedem Laserbestrahlungszyklus am Beispiel von 5 Zyklen

Mit zunehmenden Laserbestrahlungszyklen kommt es zum Verbiegen der Proben. Um nur die durch thermische Oberflächenmodifikation induzierten Absorptionswertänderungen zu analysieren, wurde das Biegen für alle Versuche mit einer Einspannung des Blechs auf beiden Seiten blockiert (**Bild 4.5**, rechts).

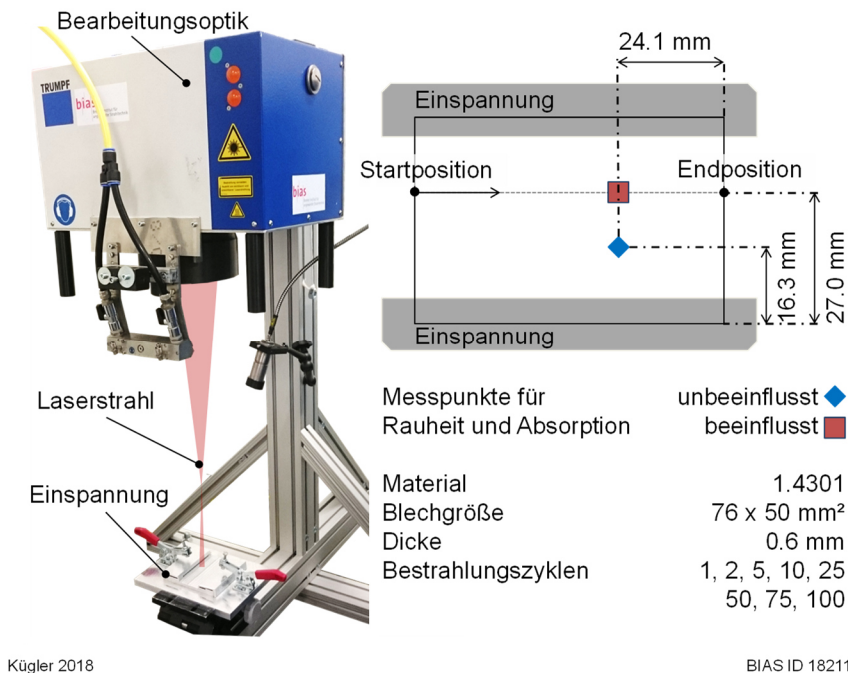


Bild 4.5: Der Aufbau der Laserstrahlbearbeitung (links) und Skizze der Messpunkte und Einspannsituation der Blechproben (rechts)

4.2.3 Verwendung linearer Werkstoffenerwärmung für einen Biegeprozess

Für den Biegeprozess wurde der Prozessaufbau der linearen Werkstoffenerwärmung genutzt (siehe **Kapitel 4.2.2**). Die Prozessparameter wurden der verwendeten Blechdicke von 1.5 mm (siehe **Tabelle 4.2**) angepasst. Während des Prozesses wurde nur eine Blechkante fest eingespannt. Der Laserbestrahlungspfad hatte einen Abstand von 15 mm zur Blechkante. Die Prozessanordnung ist schematisch in **Bild 4.6** dargestellt.

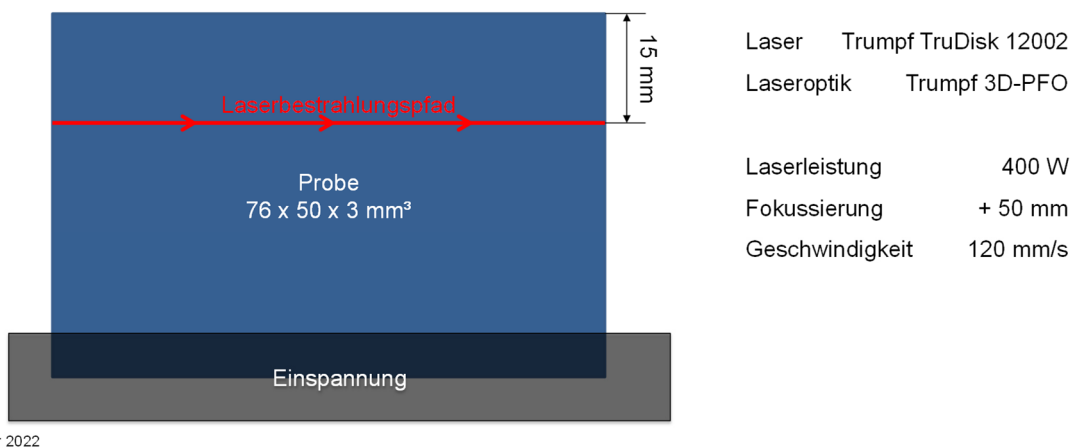


Bild 4.6: Schematische Darstellung der Prozessanordnung zum Laserstrahlbiegen



Bild 4.7: Beispiele von Proben aus dem Biegeprozess (links: 30 Bestrahlungszyklen, rechts: 5 Bestrahlungszyklen)

4.2.4 Flächige Werkstückerwärmung durch Erwärmung in einem Ofen

Zusätzlich wurden die Proben aus der gleichen Charge der linearen Werkstückerwärmung in einem Ofen erhitzt. Durch die flächige Erwärmung wird der Effekt der Biegung vermieden und es können die Temperatureinflüsse auf Rauheits- und Absorptionsänderung davon separiert untersucht werden. Diese Wärmebehandlung wurde mit einem Nabertherm N7/H-Kammerofen mit einer maximalen Leistung von 3 kW und einer maximalen Temperatur von 1280 °C durchgeführt. Im Inneren des Ofens wurde ein 20 mm Stahlblock platziert, dessen Temperatur mit einem Thermoelement vom Typ K gemessen wurde. Die Proben wurden ebenfalls mit Thermoelementen vom Typ K ausgestattet und im vorgeheizten Ofen auf den Stahlblock gelegt. Nach Erreichen der Zieltemperatur wurde jede Probe 1 Minute lang auf dieser Temperatur gehalten. Anschließend wurden die Proben aus dem Ofen genommen und an Luft abgekühlt.

Die Wärmebehandlungen wurden mit Temperaturen in acht Parameterschritten mit je 100 °C von 100 °C bis 800 °C variiert, wobei jeweils drei Proben je Temperaturschritt angefertigt wurden.

4.2.5 Oberflächenmodifikation durch plastische Verformung

Für die Analyse der Auswirkung rein plastischer Oberflächenveränderung wurden taillierte Zugproben aus den Blechen der Materialcharge 1 vorbereitet (siehe **Tabelle 4.2**). Die Proben wurden auf eine Breite von 10 mm tailliert (siehe **Bild 4.8**). Die Ausgangsmesslänge im taillierten Bereich, anhand derer die Dehnung der Probe errechnet wurde, betrug $7^{+0.2}_{-0.3}$ mm.

Die Versuche wurden in einer Zugprüfmaschine (ZwickRoell AllroundLine Z250) durchgeführt. Die taillierten Proben wurden mit Zugspannungen von 500 N/mm^2 und 600 N/mm^2 (bezogen auf den taillierten Querschnitt) beansprucht.

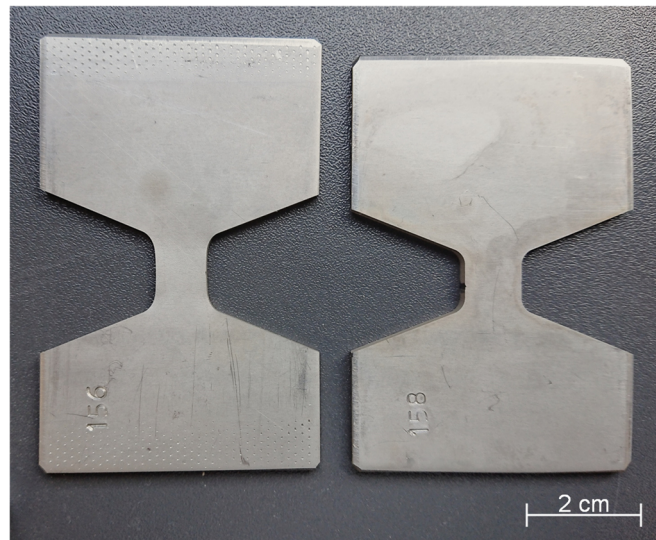


Bild 4.8: Taillierte Blechproben nach (links) und vor (rechts) der plastischen Verformung in einer Zugprüfmaschine. Blechdimension vor der Verformung: $76 \times 50 \times 3 \text{ mm}^3$

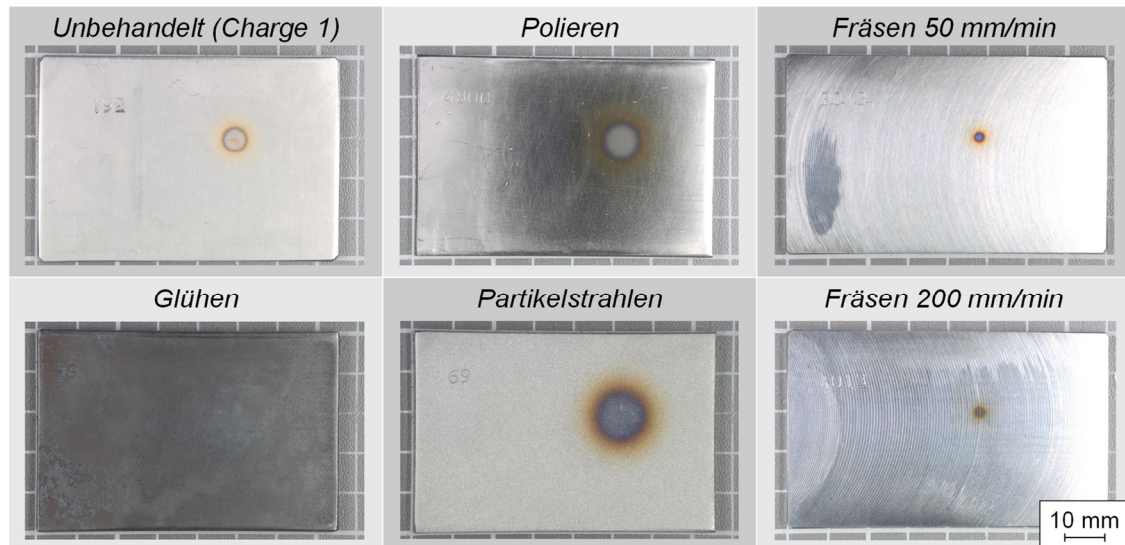
4.3 Probenvorbehandlung

Für die Analyse der Auswirkungen der initialen Oberflächenbeschaffenheit wurden verschiedene Vorbehandlungen gewählt. Die Verfahren *Partikelstrahlen*, *Polieren*, *Glühen*, *Fräsen* und *Schleifen* wurden eingesetzt. Diese Vorbehandlungen dienen dazu, die initiale Oberflächenstruktur zu modifizieren. Die Art und Weise der Verfahrensdurchführung zur Probenvorbehandlung ist daher nicht maßgeblich, sondern die anschließende Messung der damit erreichten Oberflächenstruktur. Es wurde jedoch darauf geachtet, dass stets die gleichen Verfahren zur Oberflächenvorbehandlung angewendet wurden. Insbesondere für die händisch ausgeführten Prozesse wurde für die Erreichung größtmöglicher Reproduzierbarkeit einer Oberflächenvorbehandlung die Probenpräparation möglichst von der gleichen Person durchgeführt.

Dabei wurden Proben aus der Materialcharge 1 verwendet, um die Vorbehandlungen *Partikelstrahlen*, *Polieren*, *Glühen* und *Fräsen* sowie unbehandeltes Probenmaterial zu untersuchen.

Aus der Materialcharge 2 wurden Proben hergestellt, um die Vorbehandlung *Schleifen* zu untersuchen. Zusätzlich wurden unbehandelte Proben aus diesem Material hergestellt, um einen Chargeneinfluss zu untersuchen.

Eine Übersicht der resultierenden Oberflächen ist in **Bild 4.9** (für Proben aus der Materialcharge 1) und **Bild 4.10** (für Proben aus der Materialcharge 2) dargestellt.



Kügler 2022

Bild 4.9: Beispiele der Vorbehandlungen von Proben aus Charge 1 (aufgenommen nach der Laserstrahlbearbeitung)

Bei der Vorbehandlung *Partikelstrahlen* wurden Bleche der Materialcharge 1 mit Edelmetallkorund des Typs F70 gestrahlt. Die Korngröße der Korundpartikel betrug dabei zwischen $180\ \mu\text{m}$ und $250\ \mu\text{m}$. Der Prozess wurde so lange durchgeführt, bis eine optisch gleichmäßig matte Oberfläche erkennbar war. Die Proben wurden beidseitig gestrahlt, um etwaige Verformungen durch den Präparationsprozess auszugleichen.

Die Proben der Vorbehandlung *Polieren* wurden von Hand mit Watte und Poliermittel präpariert. Zum Einsatz kamen dabei in zunehmend feinerer Abstufung Diamantpasten mit einer Partikelgröße von $3\ \mu\text{m}$ und $1\ \mu\text{m}$ sowie eine Siliziumdioxidsuspension mit einer Partikelgröße von $0.04\ \mu\text{m}$. Die Proben wurden vor diesem Poliervorgang nicht geschliffen. Die tieferliegende Oberflächenstruktur wurde durch diese Vorbehandlung nicht erreicht. Die resultierende Oberfläche ist daher spiegelnd, jedoch nicht unbedingt optisch kratzerfrei.

Die Proben mit einer Wärmeverbehandlung (Vorbehandlung *Glühen*) wurden in einen auf die Zieltemperatur vorgewärmten Ofen (Nabertherm N7/H, Leistung: 3 kW) auf eine vorgewärmte Stahlplatte (Dicke: 20 mm) gelegt, um eine ausreichende Wärmeübertragung zu gewährleisten. Die Temperatur wurde mit Thermoelementmessungen (Typ K) sowohl an der Probe als auch auf der Stahlplatte, die als Unterlage verwendet wurde, überprüft. Nach einer Aufwärmphase wurden die Bleche 2 Stunden auf der Zieltemperatur $1000\ ^\circ\text{C}$ gehalten, bevor sie dem Ofen entnommen und an Luft abgekühlt wurden.

Die Proben der Vorbehandlung *Fräsen* wurden mit zwei unterschiedlichen Fräsparametern präpariert. Mit dem eingesetzten 5-Schneiden-Fräser ($\varnothing 80\ \text{mm}$) mit Hartme-

tall-Schneidplatten wurden die Proben mit einer Drehzahl von 300 min^{-1} mit zwei unterschiedlichen Vorschüben von 50 mm/min und 200 mm/min oberflächlich überfräst. Dabei wurden 0.3 mm von der Probe abgetragen, sodass bei diesen Proben eine Blechdicke von 2.7 mm vorliegt. Teilweise wurde nicht die gesamte Oberfläche gleichmäßig bearbeitet. Dies kann an einer Wölbung der Probe liegen. Maßgeblich für die Verwendung der Probe war, dass die Position der Punktbestrahlung in einem Bereich gleichmäßiger Bearbeitung liegt.

Die Proben der Vorbehandlung *Schleifen* wurden von Hand mit Schleifpapier unterschiedlicher Körnungen bearbeitet. Verwendet wurden die Körnungen P80, P220 und P600. Kriterium für eine ausreichende Bearbeitung war das optisch gleichmäßige Erscheinungsbild der bearbeiteten Oberfläche, insbesondere im Bereich der Position für die nachfolgende Punktbestrahlung.

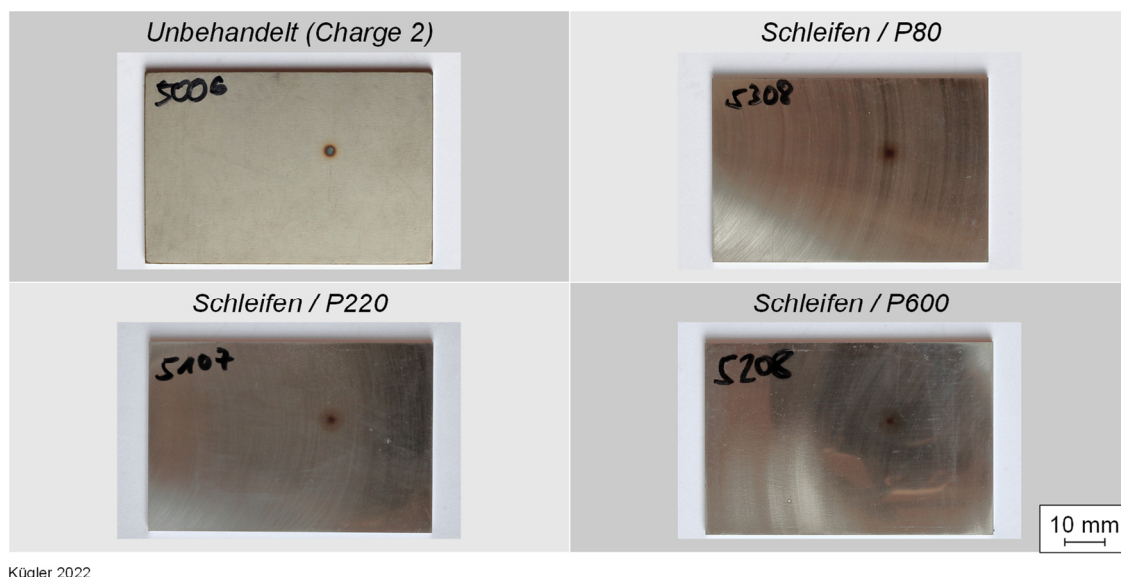


Bild 4.10: Beispiele der Vorbehandlungen von Proben aus Charge 2 (aufgenommen nach der Laserstrahlbearbeitung)

4.4 Analysen

4.4.1 Beschreibung der Bestrahlungsintensität durch die temperaturkompensierte Zeit

Um die Auswirkungen auf die Absorption zu untersuchen, wurden sowohl verschiedene Temperaturen als auch Haltezeiten, wie in **Kapitel 4.2.1** beschrieben, eingestellt. Für die Vergleichbarkeit der Auswirkungen der Temperatureinwirkung ist ein Kennwert erforderlich, der den Temperatur-Zeit-Verlauf einschließlich der Aufheiz- und Abkühlphasen charakterisiert. Ein solcher Kennwert wurde bereits für die Beschreibung von Diffusionsvorgängen in der Pulvermetallurgie als temperaturkompensierte Zeit definiert

[138]. Die in Gleichung (4.1) beschriebene Berechnung der temperaturkompensierten Zeit ähnelt der Gleichung für den Diffusionskoeffizienten für Diffusionsprozesse in Feststoffen, jedoch wird bei der temperaturkompensierten Zeit über die Prozesszeit integriert.

$$t_k = \int_0^t D_0 e^{-\frac{Q_{eff}}{k_B T(\bar{t})}} d\bar{t} \quad (4.1)$$

Durch die numerische Integration des Temperaturmesssignals $T(\bar{t})$ über die Zeit \bar{t} und Literaturwerten für die Boltzmann-Konstante k_B , die Aktivierungsenergie Q_{eff} und den Vorfaktor des Diffusionskoeffizienten D_0 kann die temperaturkompensierte Zeit ermittelt werden.

Diese wird in der Einheit m^2 angegeben, was zunächst unüblich erscheint. Allerdings kann die temperaturkompensierte Zeit t_k , durch die Betrachtung der Gleichung für die Eindringtiefe x eines Diffusionsvorgangs, der durch den effektiven Diffusionskoeffizienten D_{eff} und die Wirkdauer t_W beschrieben wird, veranschaulicht werden:

$$x = \sqrt{2 D_{eff} t_W} = \sqrt{2 t_k} \quad (4.2)$$

Die temperaturkompensierte Zeit kann durch numerische Integration der Temperaturmesswerte bestimmt werden. Für die Aktivierungsenergie Q_{eff} und den Vorfaktor des Diffusionskoeffizienten D_0 werden Literaturwerte genutzt.

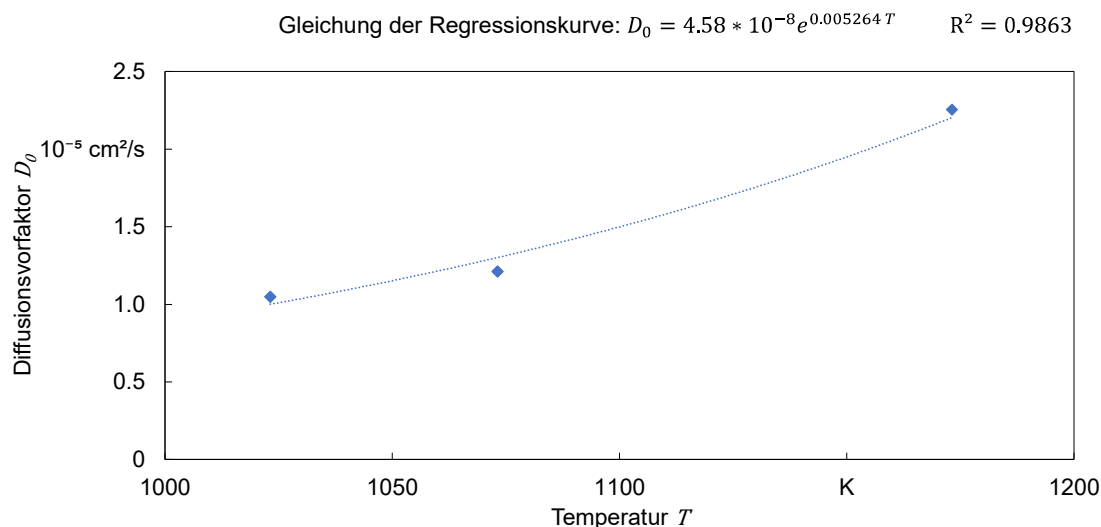
Für die Aktivierungsenergie wird der Wert von 213 kJ/mol verwendet, der bei Untersuchungen von Huntz et al. [126] für die Oxidation des Werkstoffs AISI 304 an Luft ermittelt wurde (siehe Stand der Forschung, Seite 29). Für die Auswertung wird dieser Wert gewählt, weil die Untersuchungen zur Bestimmung dieses Werts im Temperaturbereich 850 °C bis 950 °C durchgeführt wurden. Die Überdeckung mit dem verwendeten experimentellen Temperaturbereich ist daher für diese Werte am größten.

Diffusionsvorgänge in Feststoffen können über eine Arrhenius-Gleichung gemäß Gleichung (4.3) beschrieben werden [139]. Um den Vorfaktor des Diffusionskoeffizienten D_0 anhand der Literaturdaten für den effektiven Diffusionskoeffizienten von Sabioni et al. ([124], siehe Stand der Forschung, Seite 27) berechnen zu können, ist eine Umformung zu dem in Gleichung (4.4) beschriebenen Zusammenhang erforderlich.

$$D_{eff} = D_0 e^{-\frac{Q_{eff}}{k_B T}} \quad (4.3)$$

$$D_0 = \frac{D_{eff}}{e^{-\frac{Q_{eff}}{k_B T}}} \quad (4.4)$$

Der Vorfaktor des Diffusionskoeffizienten D_0 kann mit den Daten von Sabioni et al. [124] aus **Bild 2.2** mithilfe der nach D_0 umgestellten Gleichung (4.4) berechnet werden. Die ermittelten Werte und die Regressionsfunktion sind in **Bild 4.11** dargestellt.



Kügler 2020

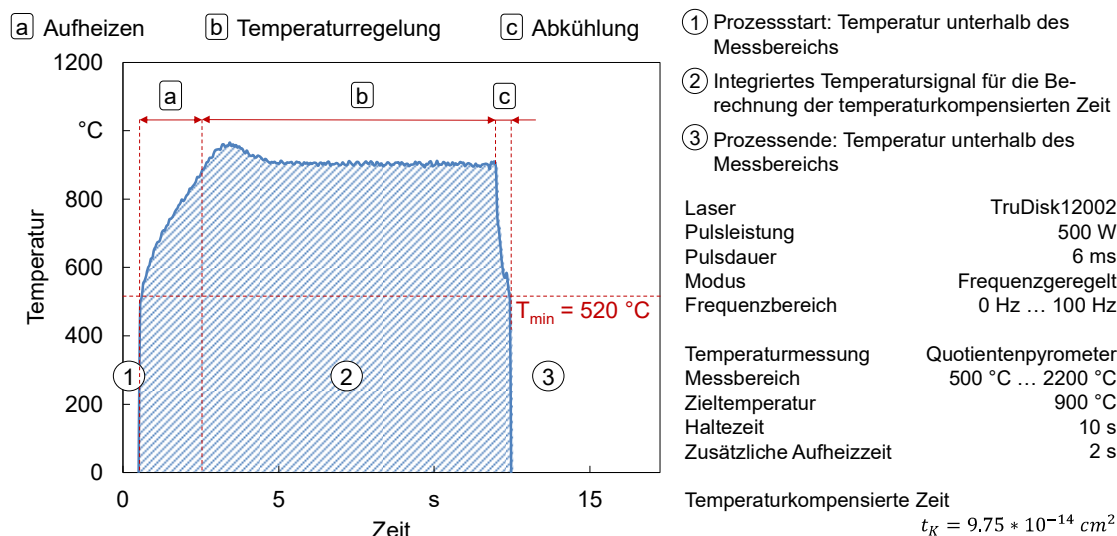
Bild 4.11: Vorfaktor des Diffusionskoeffizienten D_0 als Funktion der Temperatur berechnet auf Basis der Daten von Sabioni et al. [124] (siehe **Bild 2.2**).

Die in den beschriebenen Auswertungen verwendeten Faktoren zur Berechnung der temperaturkompensierten Zeit, wie sie in Gleichung (4.1) definiert wurde, sind in **Tabelle 4.3** aufgeführt, wobei T die Temperatur des Werkstücks ist.

Tabelle 4.3: Verwendete Faktoren für die Berechnung der temperaturkompensierten Zeit

BEZEICHNUNG	WERT
Vorfaktor für den Diffusionskoeffizienten	$D_0 = 4.58 \cdot 10^{-8} e^{5.264 \cdot 10^{-3} T} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$
Effektive Aktivierungsenergie	$Q_{eff} = \frac{Q}{N_A}$
Aktivierungsenergie Sauerstoff in Austenit	$Q = 213 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$
Avogadro-Konstante	$N_A = 6.022 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}$
Boltzmann-Konstante	$k_B = 1.380649 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$

In **Bild 4.12** ist der integrierte Bereich zur Berechnung der temperaturkompensierten Zeit blau markiert. Die numerische Integration berücksichtigt Temperaturen ab 520 °C. Der Abstand von 20 °C zur minimalen Messtemperatur des Quotientenpyrometers wurde gewählt, um Messrauschen sicher von der Berechnung auszuschließen. Die in diesem Beispiel ermittelte temperaturkompensierte Zeit beträgt $9.75 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^2$.



Kügler 2022

Bild 4.12: Darstellung eines Temperatur-Zeit-Verlaufs zur Illustration der Berechnung der temperaturkompensierten Zeit t_K

4.4.2 Bestimmung der Rauheits- und Oberflächenkennwerte

Die Rauheitsmessungen wurden mit einem Keyence VK 9700 Farb-3D-Laserscannmikroskop durchgeführt. Die Oberflächenrauheitswerte wurden gemäß ISO 25178 bestimmt. Dafür wurde ein 50x-Objektiv mit einer Apertur von 0.55 verwendet, was zu einem Messfeld mit einer Breite von 184.9 μm und einer Länge von 328.7 μm führt. Die Messdaten wurden mit einem Gaußfilter und einem S-Filter (Tiefpassfilter) von 0.8 μm und einem L-Filter (Hochpassfilter) von 0.5 mm gefiltert.

Für die Oberflächencharakterisierung vor und nach der Laserstrahlbearbeitung wurden vier verschiedene Oberflächenrauheitswerte gemessen: S_a (die arithmetische mittlere Höhe der Oberfläche), S_q (die quadratische mittlere Höhe der Oberfläche), S_z (die maximale Höhe der Oberfläche) und S_dq (die quadratische mittlere Steigung der Oberfläche).

Die Berechnungsformeln für die Oberflächenrauheitswerte S_a , S_q und S_z sind in Gleichung (4.5), Gleichung (4.6) und Gleichung (4.7) dargestellt.

$$S_a = \frac{1}{F} \iint_F |Z(x,y)| dx dy \tag{4.5}$$

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{F} \iint_F (Z(x,y))^2 dx dy} \tag{4.6}$$

$$S_z = Z_{\min}(x,y) + Z_{\max}(x,y) \tag{4.7}$$

Nach der Definition sind S_a , S_q und S_z Parameter, die die statistische Verteilung der Höhenwerte berücksichtigen, während der quadratische Neigungsmittelwert S_dq ein

hybrider Parameter ist, der auch mit der speziellen Form der Oberfläche zusammenhängt. Die Berechnungsformel ist in Gleichung (4.8) dargestellt.

$$Sdq = \sqrt{\frac{1}{F} \iint_F \left[\left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy} \quad (4.8)$$

Zusätzlich wurde ein Topografiefaktor S_{top} berechnet, der als der Quotient aus der gemessenen Oberfläche (die Rauheitsprofilfläche) geteilt durch die analysierte Fläche (die Mikroskopbildgröße) definiert wird. Die Rauheitsprofilfläche wird bei der Aufnahme mit dem Laserscanmikroskop anhand der Messdaten berechnet. Die analysierte Fläche ist, wie in Gleichung (4.9) beschrieben, konstant, da alle Aufnahmen bei gleicher Vergrößerung durchgeführt wurden.

$$F_{Messfeld} = 184.9 * 328.7 \mu\text{m}^2 = 60\,776.63 \mu\text{m}^2 \quad (4.9)$$

$$S_{top} = \frac{F_{Oberfläche}}{F_{Messfeld}} \quad (4.10)$$

4.4.3 Absorptionsmessung

Das Absorptionsvermögen jeder Probe wurde mit einem Aufbau charakterisiert, der eine Ulbrichtkugel ($\varnothing 100 \text{ mm}$) mit BaSO_4 -Beschichtung und drei Öffnungen enthielt (**Bild 4.13**). Die Bestrahlung der Proben wurde mit einer 300 mW-Laserdiode (Lumics LU1030M300) mit einer Wellenlänge von 1030 nm durchgeführt, die mit einem Thorlabs CFC-2X-B-Kollimator (Brennweite 2 mm) an die Kugel angeschlossen war. Die reflektierte Strahlung wurde mit einer Si-Photodiode (Thorlabs FDS100, Anstiegszeit 10 ns) gemessen. Aufgrund der hochdiffusen Reflexionsbeschichtung der Kugel wird diese Strahlung als homogenisiert angenommen, so dass die Messungen der Photodiode als repräsentativ angesehen werden. Dieses System wurde durch Messung eines Nd:YAG-Spiegels (Thorlabs NB07-K14) kalibriert. Laut Datenblatt betrug der Reflexionsgrad der unpolarisierten Laserstrahlung 99.89369 % bei einer Bestrahlung mit einer Wellenlänge von 1030 nm und einem Bestrahlungswinkel von 8° [140]. Die Messungen des Spiegels wurden auf diesen Wert eingestellt. Zudem wurde eine Messung mit einem Absorber unterhalb der Ulbrichtkugel durchgeführt, sodass ein Messwert für das Messsystem ermittelt werden konnte. Dieser Wert wurde von allen Messwerten an Proben subtrahiert werden, um eine Verfälschung um die Absorption des Messaufbaus auszuschließen. Alle Absorptionsmessungen wurden bei Raumtemperatur durchgeführt.

Während der Laserbestrahlung von 2 s wurden 4000 Werte von der Photodiode aufgezeichnet. Um ungenaue Messungen aufgrund der Reaktionszeit der Laserquelle und der Schaltelektronik zu vermeiden, wurden die ersten zehn und die letzten fünf Werte vor der Berechnung des Mittelwertes und der Standardabweichungen abgeschnitten.

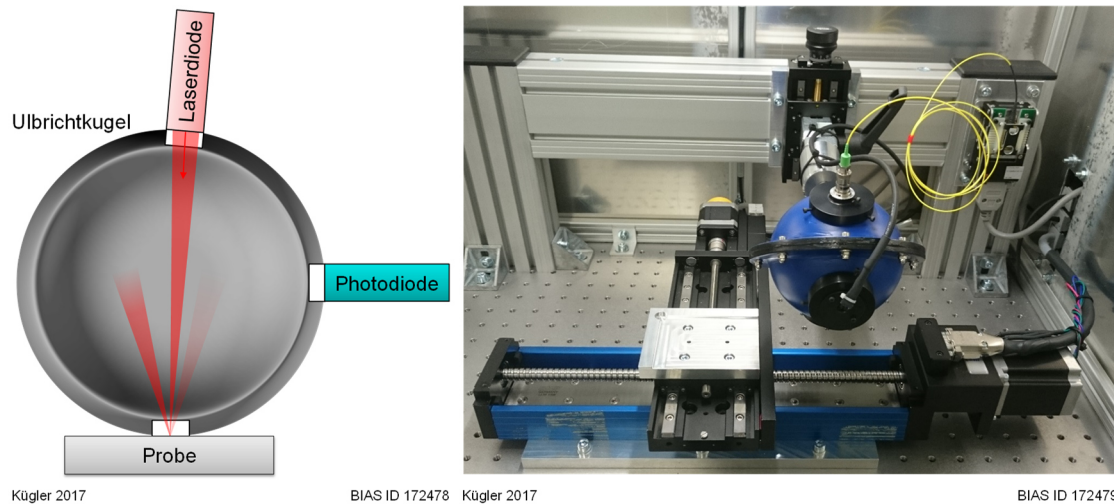


Bild 4.13: Das Prinzip des Messsystems zur Erfassung des Reflexionsanteils für die Berechnung des Absorptionsvermögens der bestrahlten Proben (links), Foto des Aufbaus in der Messstation (rechts)

4.4.4 Verformungsmessung

Bei der linearen Werkstoffverwärmung wurden die Proben auf beiden Seiten entlang des Laserstrahlwegs eingespannt. Dennoch konnte es aufgrund von Eigenspannungen zu Verzügen kommen. Die Verformungen der Proben nach der Laserbearbeitung wurden mit einem Koordinatenmessgerät (Mitutoyo CRYSTA-Apex C) gemessen. Es wurden 24 Linien quer zum Laserstrahlweg aufgezeichnet (**Bild 4.14**). Jede Linie bestand aus 430 Punkten. Diese Punkte wurden zur Berechnung eines Oberflächenprofils mit MATLAB R2016a verwendet.

Um vergleichbare und charakteristische Werte für jede Probe zu erhalten, wurde ein mittlerer Verformungswinkel berechnet. Hierfür wurde der Winkel in der direkten Umgebung des Laserstrahlwegs bestimmt. Der Winkel wurde als Mittelwert aus 6 Linien berechnet. Es wurden 41 Messpunkte definiert. Das Messfeld bestand somit aus 246 Messpunkten auf einer Fläche von 4 mm × 15 mm (2 mm zu jeder Seite des Laserstrahlenganges und 15 mm entlang des Laserstrahlwegs). Die Messlinien wurden mittig auf der Probe platziert.

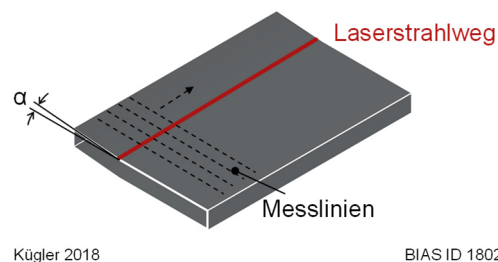


Bild 4.14: Die Verformungsmessungen nach der Laserbearbeitung.

4.4.5 Oxidschichtmessung

Die Messung der Oxidschichtdicke wurde im Querschnitt vorgenommen. Hierfür wurde im Rasterelektronenmikroskop mit einem fokussierten Ionenstrahl (engl. *Focused Ion Beam*) Material abgetragen, sodass ein Blick auf den Querschnitt der Randschicht möglich war.

Auf die zu analysierende Oberfläche wurde eine Beschichtung aufgebracht, sodass die Randschicht nicht durch die Bearbeitung mit dem Ionenstrahl beeinflusst wurde. In diesem Fall wurde Gallium im Sputterverfahren aufgetragen.

Die Untersuchungen wurden an einem Feldemissions-Rasterelektronenmikroskop des Typs Zeiss GeminiSEM am Institut für Mikrosensoren, -aktoren und -systeme (IMSAS) in Bremen durchgeführt.

4.5 Numerische Simulation eines Biegeprozesses

Die Auswirkungen eines prozessabhängigen Absorptionsgrads auf die numerische Simulation sollen anhand eines simulierten thermischen Biegeprozesses gezeigt werden. Hierfür wurde in der Software simufact.welding (Version 7.2) eine linienförmige Erwärmung einer Blechoberfläche mit einer Oberflächenwärmequelle mit einem Durchmesser von 3 mm simuliert. Der Aufbau und die Prozessführung in der Simulation entsprachen denen des Experiments der linearen Werkstoff erwärmung für einen Biegeprozess (siehe **Kapitel 4.2.3**). Dementsprechend wurde eine Bewegungsgeschwindigkeit der Wärmequelle von 120 mm/s, eine Laserstrahlleistung von 400 W und Laserbestrahlungspfad mit einem Abstand von 15 mm zur Blechkante gewählt. Das Modellblech hatte, verglichen mit dem Experiment, die identischen Abmaße von 76 x 50 x 3 mm³.

Das Modellblech wurde mit der Software Abaqus/CAE 6.14-2 vernetzt. Im Bereich der Wärmequellenführung wurde ein feineres Netz gewählt und in den nicht direkt erwärmten Randbereichen zunehmend größere Elemente (siehe **Bild 4.15**).

Die Wärmequelle wurde als Oberflächenwärmequelle ohne Volumenanteil definiert. Die Intensitätsverteilung der Wärmequelle wurde mit einer Gauß-Verteilung beschrieben. Der softwarespezifische Kennwert „*surface_gaussian_parameter*“ wurde auf einen Wert von 2 gesetzt. Je höher dieser Parameter gewählt wird, desto schmaler wird die Gaußkurve der Intensitätsverteilung angenommen.

Die Materialkennwerte des Werkstoffs 1.4301 wurden der simufact.welding Materialdatenbank entnommen.

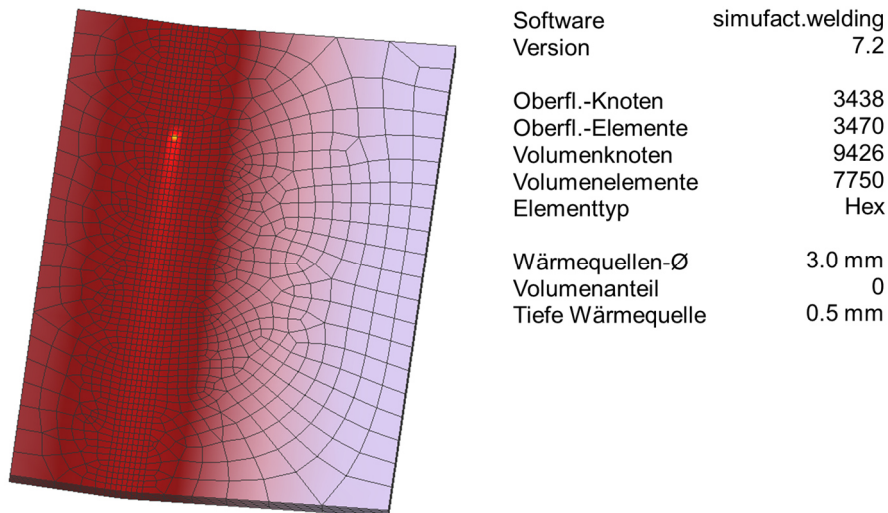


Bild 4.15: Beispiel für die Vernetzung eines Blechs für die numerische Simulation

Aus der Simulation wurden Geometrie- und Temperaturdaten in Textdateien exportiert. Die simulierten Zeitschritte waren nicht konstant. Besonders der Wechsel von der Endposition des einen Bestrahlungszyklus zur Anfangsposition des nächsten Bestrahlungszyklus konnte ebenso wie der Abkühlvorgang mit größeren Zeitschritten simuliert werden als der eigentliche Bestrahlungsvorgang. Während der Laserstrahlerwärmung betrug die Temperaturabtastrate durchschnittlich 6024 Hz.

5 Ergebnisse

5.1 Schutzgaseinfluss

Durch den Einsatz von Argon als Schutzgas konnte während der Laserstrahlbearbeitung die Abschirmung der bestrahlten Stelle von der umgebenden sauerstoffhaltigen Atmosphäre gewährleistet werden, sodass weder Anlauffarben oder andere Oberflächenveränderungen beobachtet werden konnten. Die Ergebnisse der Rauheits- und Absorptionsmessung zeigten keine Veränderungen durch die Bestrahlung. Die Proben verblieben bei allen Versuchen stets im festen Zustand. Im Folgenden werden daher nur die Ergebnisse der Experimente ohne den Einsatz von Schutzgas dargestellt.

5.2 Auswirkungen linearer Laserbestrahlung

5.2.1 Makroskopische Veränderungen

Die mehrfache Laserbearbeitung eines Stahlblechs führte zu einer deutlich sichtbaren Veränderung der Oberfläche. Diese als Anlauffarben bekannten Veränderungen sind auf die Oxidation der Oberfläche zurückzuführen, da die Laserstrahlbearbeitung ohne Schutzgas durchgeführt wurde (**Bild 5.1**).

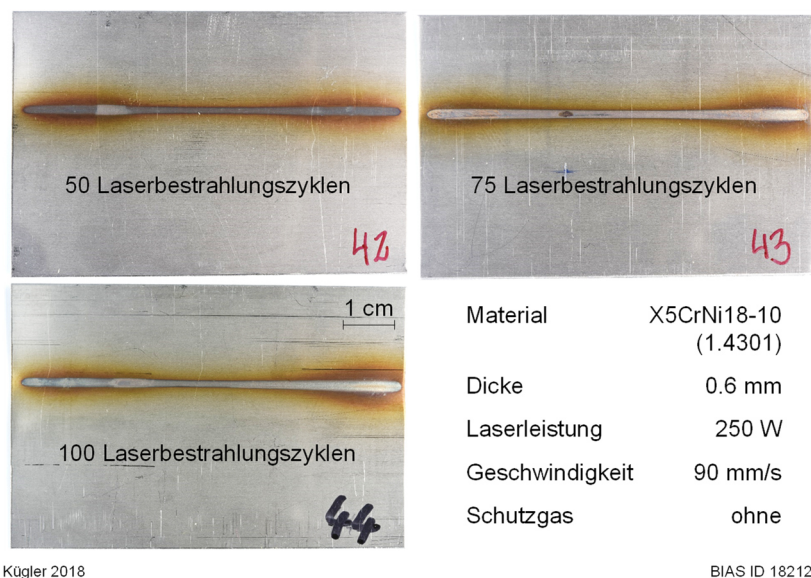


Bild 5.1: Oberflächen von Proben mit Anlauffarben nach der Laserbearbeitung.

In diesen Experimenten wurden weder Aufschmelzungen noch eine Ablation der Oberfläche beobachtet. Obwohl die Proben auf beiden Seiten des Laserstrahlpfads eingespannt waren, traten aufgrund der mehrfachen linearen Laserbestrahlung Verformungen auf.

Die durchgeführten Messungen der Probengeometrie nach der Laserbestrahlung resultieren in einem Winkelverzug quer zum laserbestrahlten Pfad (**Bild 5.2**). Abgesehen von einem Blech mit 50 Laserbestrahlungszyklen ist der Winkelverzug für bis zu 100 Bestrahlungszyklen nahezu konstant (**Bild 5.3**).

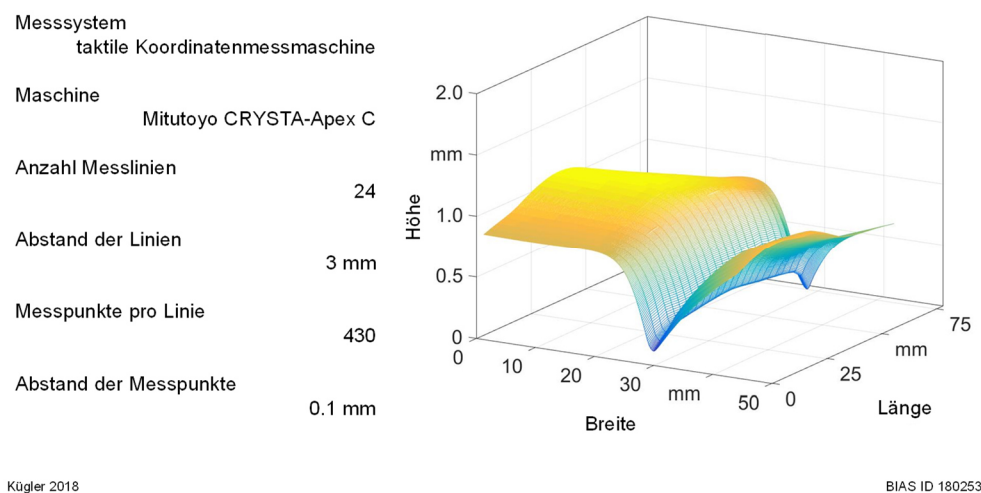


Bild 5.2: Beispiel für ein Verformungsmessergebnis mit einer Höhe von $z = 0$ beim niedrigsten Wert.

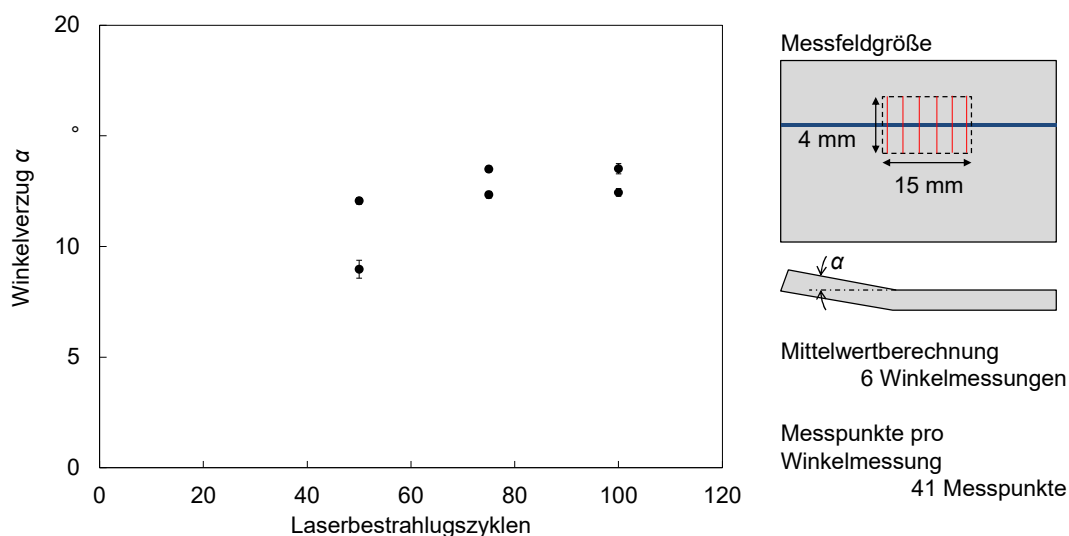
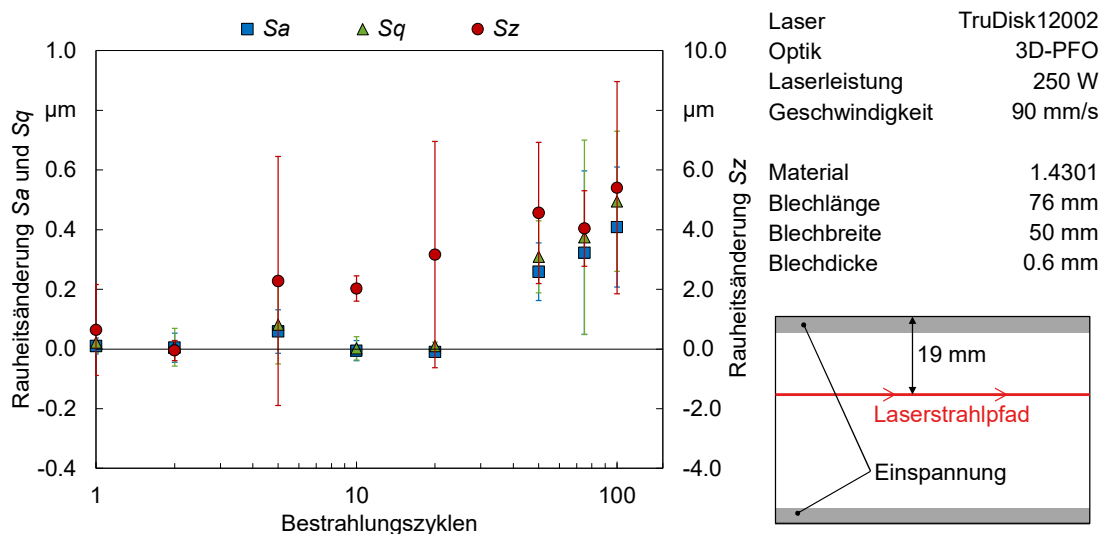


Bild 5.3: Winkelverzug von sechs Proben nach mehrfacher Laserbestrahlung (gemittelte Werte aus jeweils sechs Linienmessungen mit je 41 Messpunkten).

5.2.2 Rauheitsänderungen infolge einer linearen Laserbestrahlung

Bei der Analyse von Oberflächenrauheitswerten konnte festgestellt werden, dass die Oberflächen mit zunehmender Anzahl von Laserbestrahlungszyklen rauer werden. **Bild 5.4** zeigt, dass die Mittelwerte der Rauheitskennwerte S_a und S_q bis 20 Bestrahlungszyklen im Rahmen der Standardabweichungen konstant bleiben und

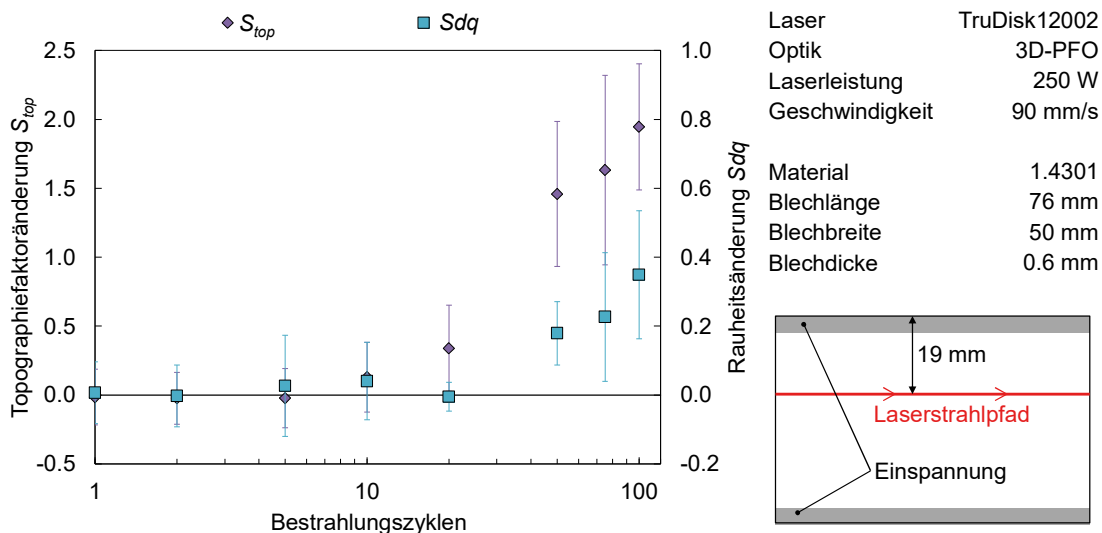
dann mit zunehmender Anzahl der Bestrahlungszyklen ansteigen. Die maximale Höhe S_z nimmt jedoch bereits bei 10 Bestrahlungszyklen zu.



Kügler 2020

Bild 5.4: Einfluss mehrfacher Laserbestrahlung auf die Oberflächenrauheitswerte.

Erhöhte Oberflächenrauheitswerte führen zu einer vergrößerten Oberfläche. Dies kann durch den Topografiefaktor S_{top} dargestellt werden. Die Oberflächen der gemessenen Proben sind bei konstanter Messfläche nahezu verdoppelt (**Bild 5.5**). Der hybride Rauheitswert S_{dq} zeigt ein vergleichbares Verhalten (**Bild 5.5**).



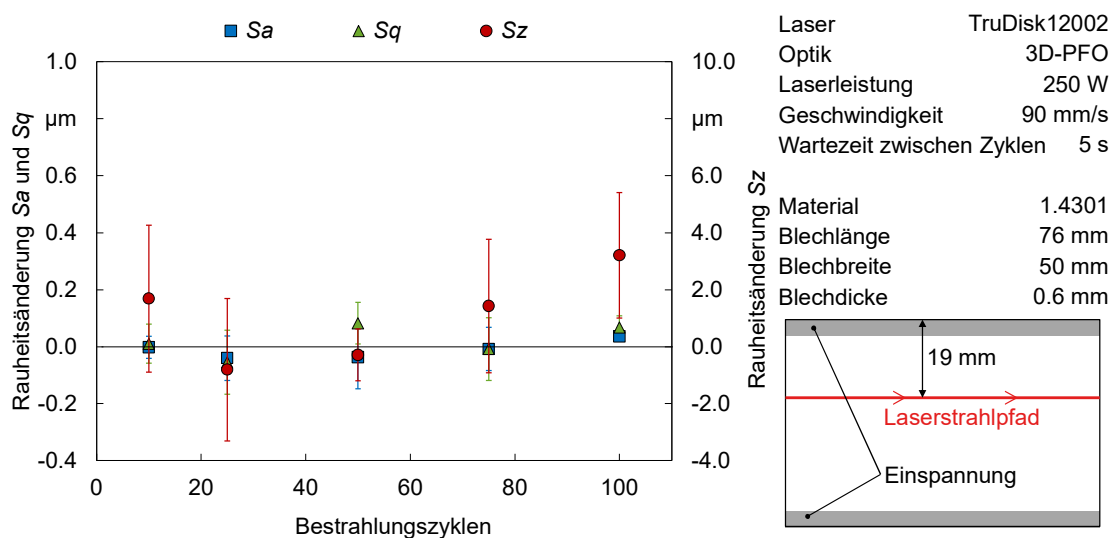
Kügler 2020

Bild 5.5: Einfluss von mehrfacher Laserbestrahlung auf den hybriden Oberflächenrauheitswert S_{dq} und den Topografiefaktor S_{top} .

Um den Einfluss der akkumulierten Erwärmung aufgrund der schnellen Wiederholung von Laserbestrahlungszyklen zu bestimmen, wurden Experimente durchgeführt, bei

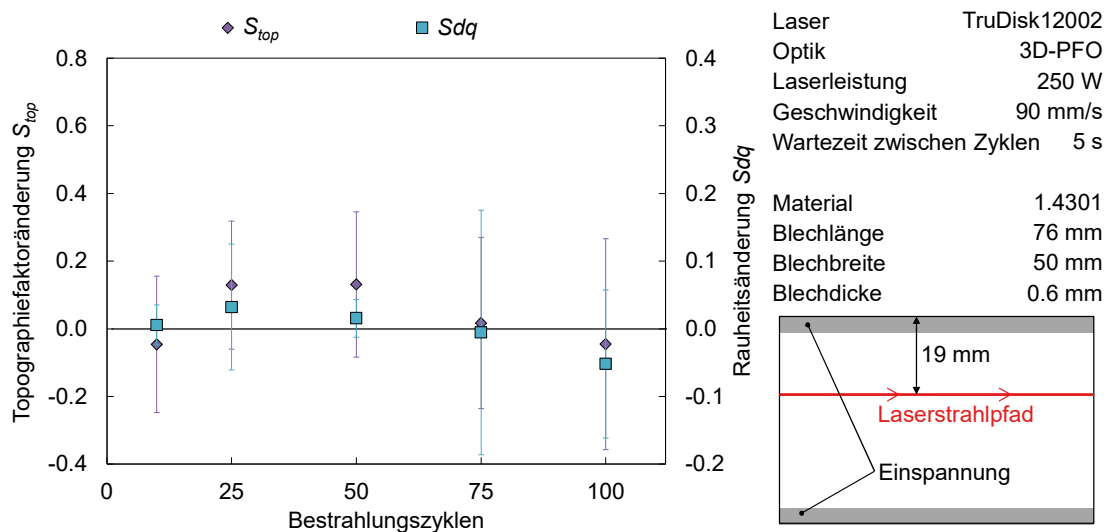
denen eine Wartezeit von 5 Sekunden nach jedem Laserbearbeitungszyklus implementiert wurde. In dieser Zeit breitet sich die zuvor angewandte Erwärmung in der Probe aus. Daher wird mit der nachfolgenden Laserstrahlbearbeitung eine kühlere Oberfläche bestrahlt als bei Versuchen ohne diese Wartezeit. Dies führt zu vergleichsweise geringeren Winkelverzügen und Farbveränderungen der bestrahlten Proben.

Die mittleren Rauheitswerte S_a und S_q bleiben innerhalb der Standardabweichungen und werden daher als konstant angesehen. Die maximale Höhe S_z wird für 100 Laserbestrahlungszyklen auf bis zu $3.2 \mu\text{m}$ erhöht, wobei der ermittelte Wert einer hohen Standardabweichung unterliegt (**Bild 5.6**). Im Gegensatz zu den leicht ansteigenden Rauheitswerten sind der Topografiefaktor S_{top} und der hybride Oberflächenrauheitswert S_{dq} nahezu konstant (**Bild 5.7**).



Kügler 2020

Bild 5.6: Einflüsse auf die Oberflächenrauheitswerte bei mehrfacher Laserbestrahlung mit einer Wartezeit von 5 s nach jedem Zyklus.



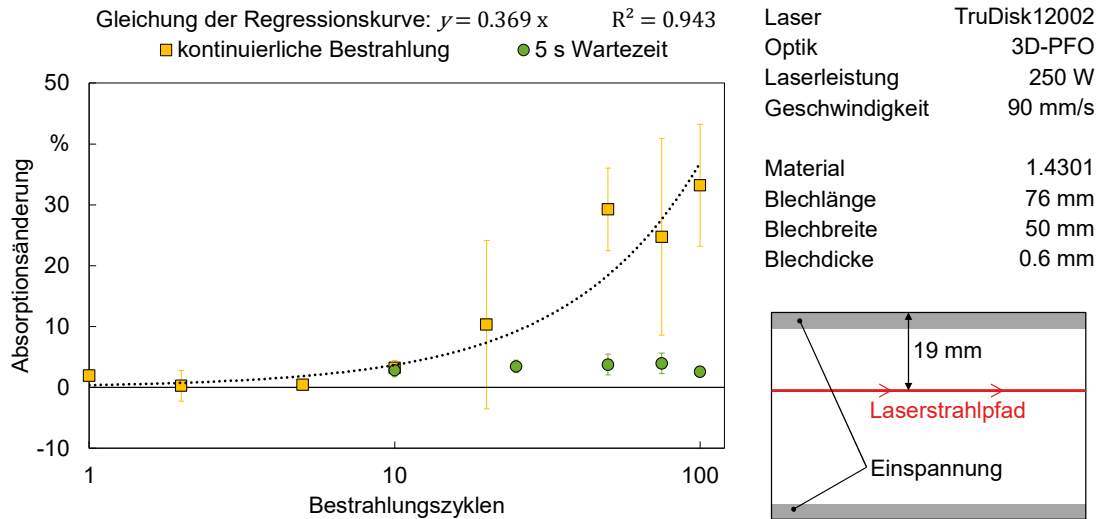
Kügler 2020

Bild 5.7: Einfluss auf den hybriden Oberflächenrauheitswert S_{dq} und den Topografiefaktor S_{top} bei mehrfacher Laserbestrahlung mit einer Wartezeit von 5 s nach jedem Zyklus

5.2.3 Absorptionsänderungen infolge einer linearen Laserbestrahlung

Das Absorptionsvermögen wird durch die Veränderung der Oberflächentopografie infolge mehrfacher Laserbearbeitung beeinflusst. Die Absorptionswerte erhöhen sich bei steigender Anzahl an Laserbestrahlungszyklen um bis zu 33.2 % (**Bild 5.8**). Die Absorptionssteigerung kann durch eine lineare Regressionsgerade durch den Ursprung beschrieben werden.

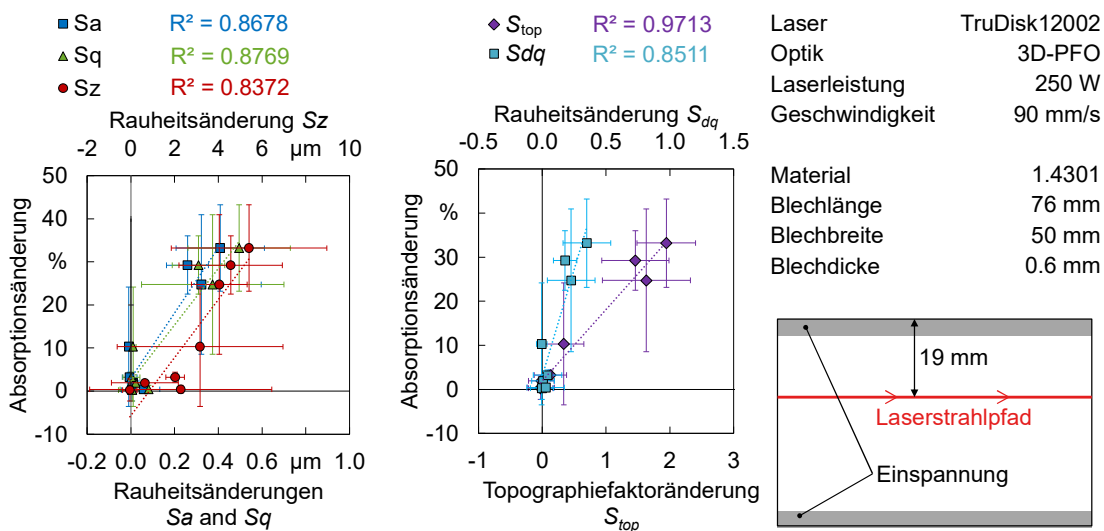
Die Veränderung der Absorptionswerte liegt für Proben mit mehrfacher Laserbearbeitung und Wartezeiten von 5 Sekunden im Durchschnitt 3.3 % über den Absorptionswerten im Ausgangszustand (**Bild 5.8**). Die Ergebnisse zeigen keinen eindeutigen Einfluss der Anzahl an Laserbestrahlungszyklen, wenn eine Wartezeit von 5 s angewendet wird.



Kügler 2022

Bild 5.8: Vergleich der Absorptionsänderungen von Proben mehrfacher linearer Laserbestrahlung mit kontinuierlicher Bestrahlung und Bestrahlungen mit Wartezeiten von 5 s nach jedem Zyklus

Eine Korrelation der Absorptionsänderung mit den Veränderungen der Oberflächenkennwerte ist in **Bild 5.9** dargestellt. Die Standardabweichungen der Messungen erschweren die Bewertung der Korrelationsqualität. Die Bestimmungskoeffizienten für die lineare Regression weisen jedoch darauf hin, dass die Oberflächenrauheitswerte und der hybride Rauheitswert S_{dq} weniger geeignet sind, Änderungen des Absorptionsvermögens zu beschreiben als der Topografiefaktor S_{top} .



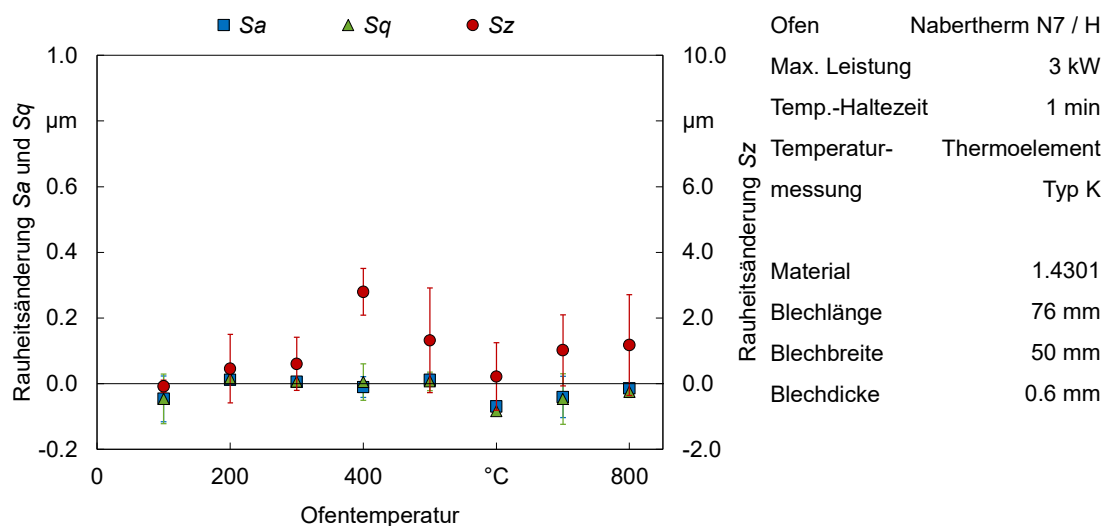
Kügler 2022

Bild 5.9: Ergebnisse der Mehrfach-Laserbearbeitung, die den Einfluss der Oberflächenrauheitswerte (links), des hybriden Oberflächenrauheitswerts S_{dq} und des Topografiefaktors S_{top} (rechts), auf das Absorptionsvermögen anhand linearer Regressionen und den zugehörigen Bestimmungskoeffizienten zeigen.

5.3 Auswirkungen einer flächigen Werkstückerwärmung

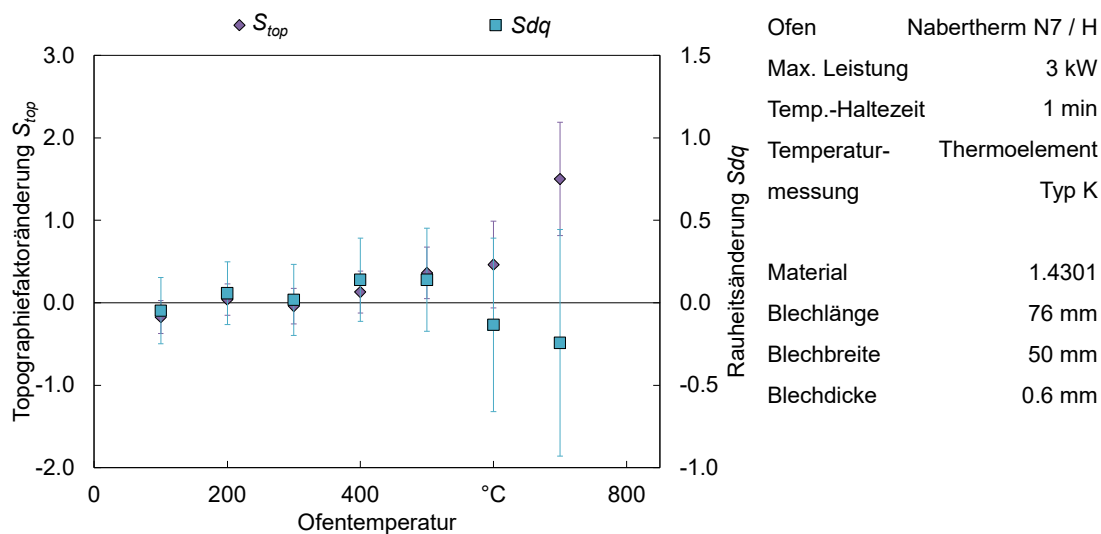
5.3.1 Rauheitsänderungen infolge flächiger Werkstückerwärmung

Die Rauheitsänderungen der im Ofen erwärmten Proben sind ähnlich wie bei den Proben mit Wartezeit zwischen den Laserbestrahlungszyklen nicht signifikant (**Bild 5.10**). Nur für Proben, die einer Temperatur von 400 °C ausgesetzt wurden, erhöht sich die maximale Höhe S_z auf 2.8 µm. Die mittleren Rauheitswerte S_a und S_q bleiben in Temperaturbereichen von 20 °C bis 800 °C nahezu konstant. Der Topografiefaktor S_{top} zeigt jedoch ein anderes Verhalten bei ofenerwärmten Proben (**Bild 5.11**). Im Gegensatz zur Laserbearbeitung weisen die Oberflächenrauheitswerte S_dq auf eine andere Tendenz des Topografiefaktors S_{top} hin. Allerdings steigen die Standardabweichungen bei Temperaturen ab 600 °C auffällig an (**Bild 5.11**).



Kügler 2020

Bild 5.10: Einfluss einer flächigen Werkstückerwärmung im Ofen auf die Oberflächenrauheitswerte

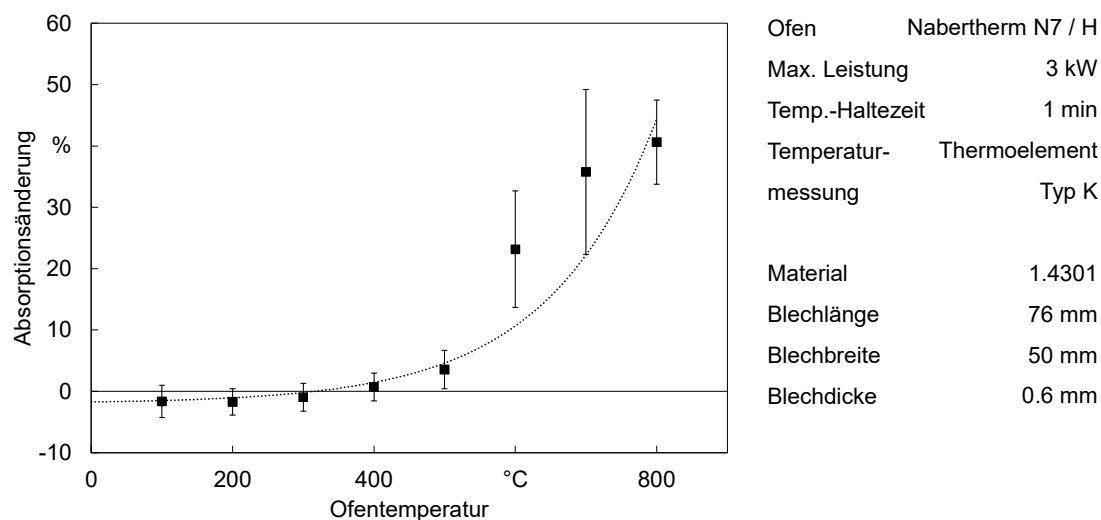


Kügler 2020

Bild 5.11: Einfluss einer flächigen Werkstück erwärmung im Ofen auf den hybriden Rauheitswert S_{dq} und den Topografiefaktor S_{top}

5.3.2 Absorptionsänderungen infolge flächiger Werkstück erwärmung

Die Absorptionswerte von ofenerwärmten Proben stiegen mit höheren Temperaturen an (Bild 5.12). Bis 400 °C wurde keine signifikante Absorptionsveränderung gemessen. Für den Temperaturbereich 600 °C bis 800 °C wurde jedoch eine Absorptionssteigerung zwischen 9.9 % und 40.6 % je Probe ermittelt.



Kügler 2020

BIAS ID 190191

Bild 5.12: Absorptionsänderung von Proben mit flächiger Erwärmung

5.4 Auswirkungen temperaturgeregelter Punktbestrahlungen

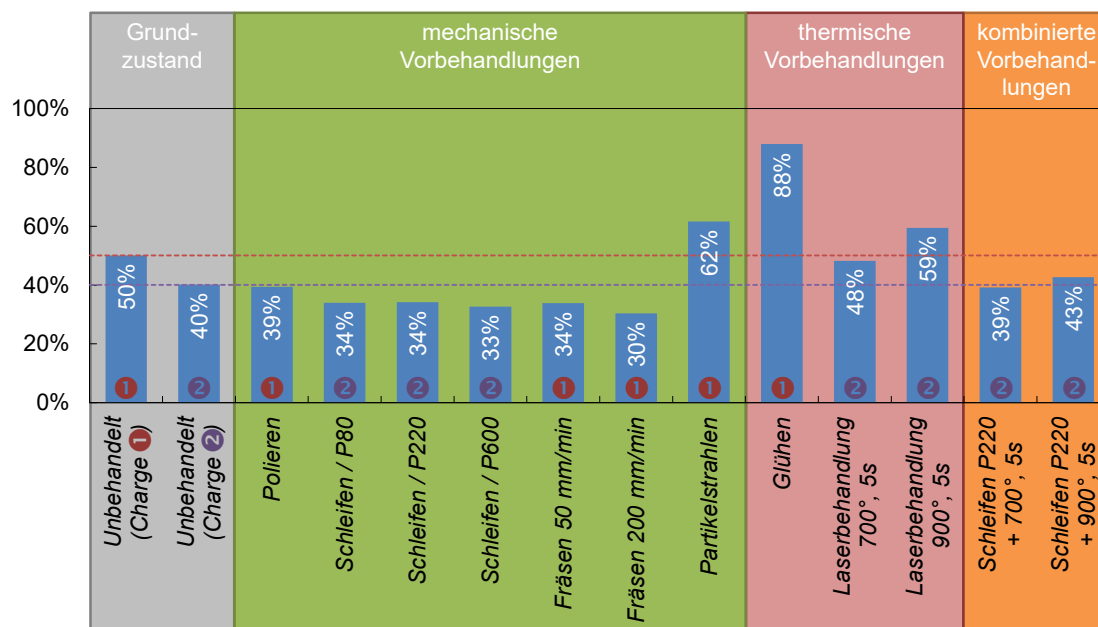
5.4.1 Einfluss der initialen Oberflächenbeschaffenheit

Der Einfluss der initialen Oberflächenbeschaffenheit auf die Absorption von Laserstrahlungen wurde an den Proben für die Untersuchung der temperaturgeregelten Punktbestrahlung gemessen und ist in **Bild 5.13** dargestellt. Dabei sind die Daten der Vorbehandlungen jeweils mit einer Identifikationsnummer der jeweiligen Charge markiert.

Die kombinierten Vorbehandlungen bezeichnen Proben, die zuerst mit Schleifpapier der Körnung P220 geschliffen wurden und anschließend eine Vorbehandlung mittels Laserstrahlerwärmung erfahren haben. Die Absorptionswerte dieser Vorbehandlungen liegen jeweils über dem des geschliffenen Zustands, wobei eine Laserbestrahlung mit höherer Temperatur zu einem höheren Absorptionswert führte.

Bei einer mechanischen Vorbehandlung führte nur das *Partikelstrahlen* zu einer Erhöhung der Absorption verglichen mit dem Ausgangszustand. Bei den Vorbehandlungen *Fräsen*, *Schleifen* und *Polieren* wurden geringere Absorptionswerte als im Ausgangszustand gemessen.

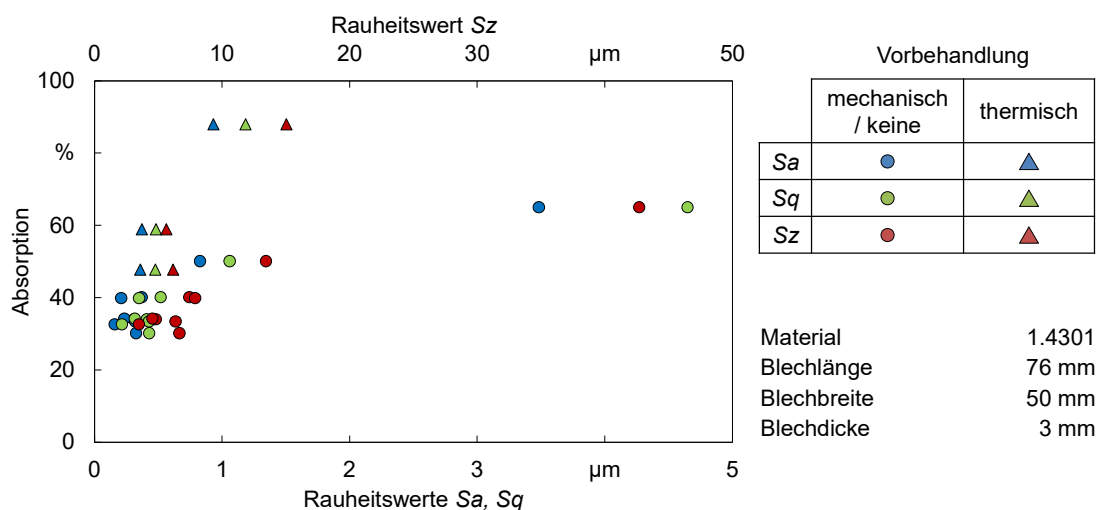
Thermische Vorbehandlungen, sowohl mit dem Laserstrahl als auch im Ofen (Vorbehandlung *Glühen*), führten zu einer Erhöhung der Absorptionswerte. Dies gilt auch für kombinierte Vorbehandlungen. Die Erhöhung durch die thermische Vorbehandlung wurde bezogen auf den geschliffenen Zustand der Probe gemessen.



Kügler 2022

Bild 5.13: Initiale Absorptionswerte von Proben unterschiedlicher Vorbehandlung mit Indikation der Charge

Die Rauheits- und Topografiekenwerte werden durch die verschiedenen Vorbehandlungen unterschiedlich beeinflusst. Die Absorptionenwerte in Abhängigkeit der durch die Vorbehandlungen herbeigeführten Kennwerte sind in **Bild 5.14** für die Rauheitskennwerte und in **Bild 5.15** für die Topografiekenwerte dargestellt.



Kügler 2022

Bild 5.14: Absorptionenwerte unterschiedlicher Vorbehandlungen vor der Laserbestrahlung in Abhängigkeit der Rauheitskennwerte

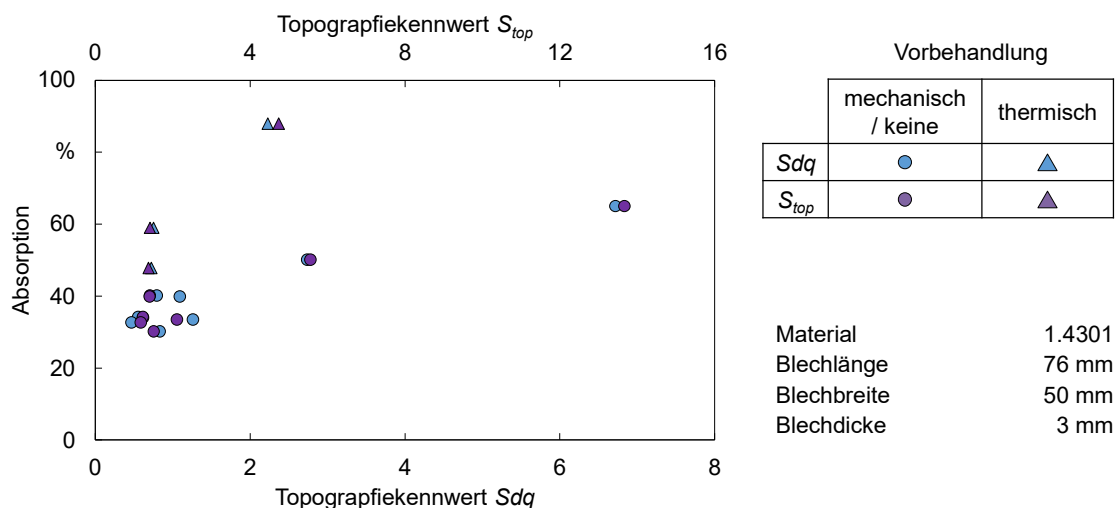


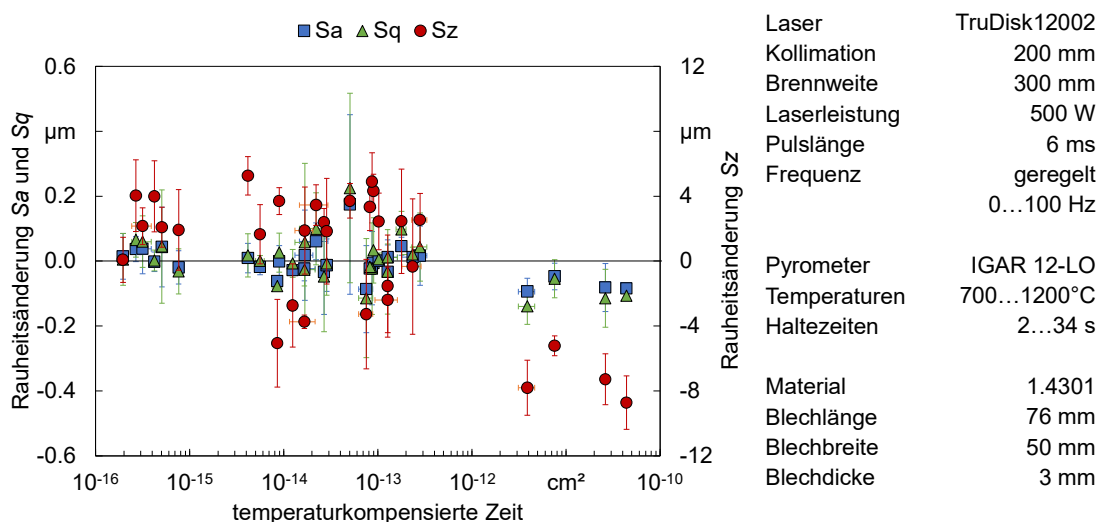
Bild 5.15: Absorptionenwerte unterschiedlicher Vorbehandlungen vor der Laserbestrahlung in Abhängigkeit der Topografiekenwerte

5.4.2 Rauheitsänderungen infolge temperaturgeregelter Punktbestrahlung

Bei der punktuellen Erwärmung von Proben mit dem Laserstrahl werden sowohl Variationen der Temperatur als auch Bestrahlungsdauer genutzt, um den Einfluss der Erwärmung zu untersuchen. Die Veränderung der Rauheitswerte wird daher über den berech-

neten Wert der temperaturkompensierten Zeit aufgetragen, um die Einflüsse von Temperatur und Bestrahlungsdauer gleichzeitig miteinzubeziehen.

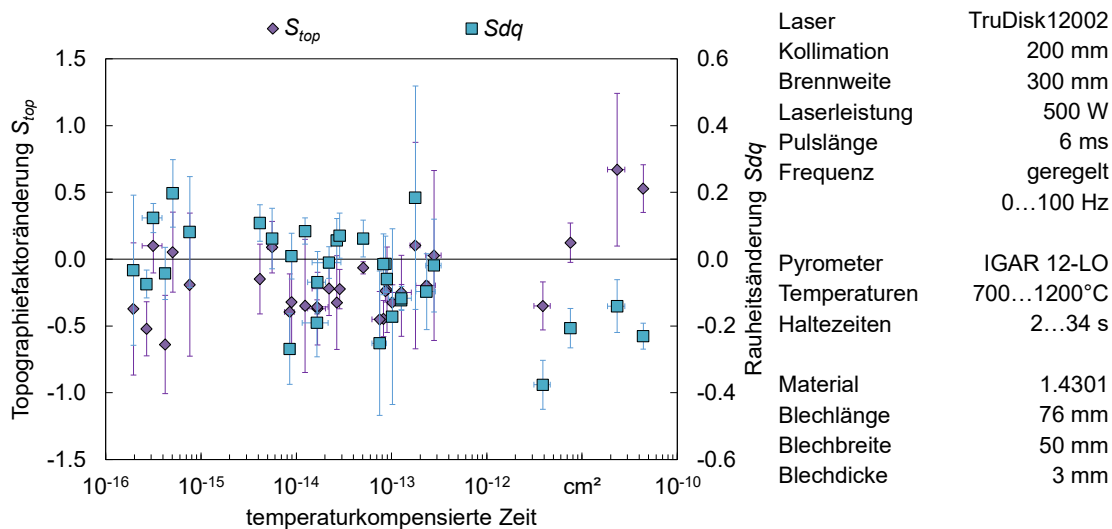
In **Bild 5.16** ist dargestellt, dass sowohl für die gemittelten Rauheitswerte S_a und S_q als auch für die Rautiefe S_z für kleine Werte der temperaturkompensierten Zeit unter 10^{-12} cm² kein eindeutiger Trend erkennbar ist. Bei höheren Werten hingegen nimmt die Rautiefe S_z ab. Auch die Rauheitswerte S_a und S_q deuten eine Reduktion der Rauheit infolge dieser Laserstrahlerwärmung an.



Kügler 2022

Bild 5.16: Einfluss einer temperaturgeregelten Punktbestrahlung auf die Oberflächenrauheitswerte

Der Trend einer glatter werdenden Oberfläche infolge intensiver Laserbestrahlung kann durch den hybriden Rauheitswert S_{dq} und den Topografiefaktor S_{top} nicht bestätigt werden. In **Bild 5.17** ist die Änderung dieser Kennwerte über die temperaturkompensierte Zeit dargestellt. Während intensive Laserbestrahlungen mit temperaturkompensierten Zeiten von mehr als 10^{-12} cm² eine Reduktion des hybriden Rauheitskennwerts S_{dq} andeuten, werden beim Topografiefaktor sowohl reduzierte als auch gesteigerte Werte ermittelt.

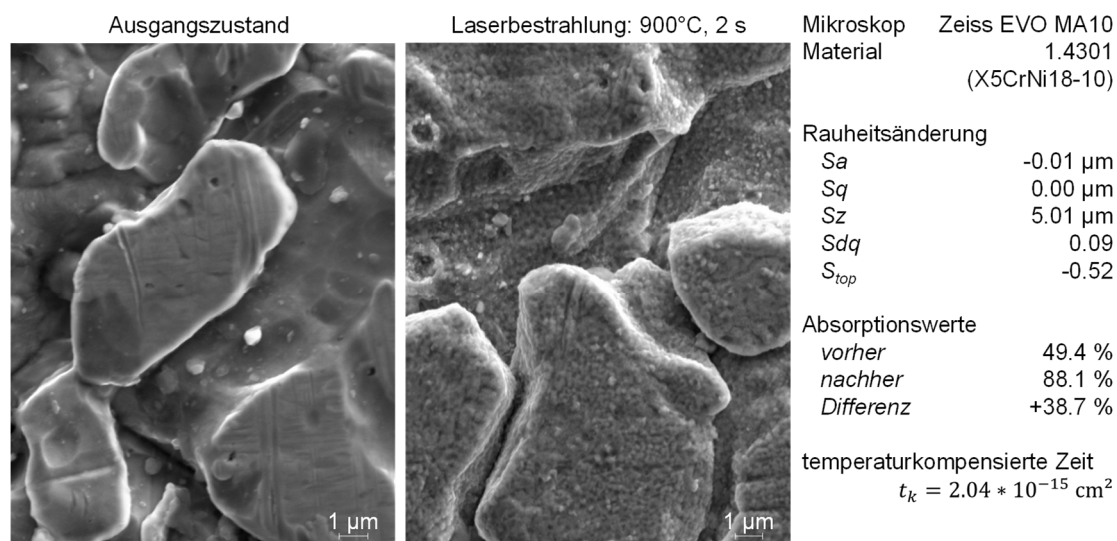


Kügler 2022

Bild 5.17: Einfluss einer temperaturgeregelten Punktbestrahlung auf den hybriden Rauheitswert S_{dq} und den Topografiefaktor S_{top}

5.4.3 Mikrostrukturelle Veränderungen

Die Oberflächenstruktur nichtrostender Stahlbleche wird durch die Laserbestrahlung ohne Schutzgas im Submikrometerbereich beeinflusst. In **Bild 5.18** ist die Veränderung infolge einer kurzzeitigen Laserbestrahlung dargestellt. Nach einer Wärmeeinwirkung sind im Rasterelektronenmikroskop auf der zuvor glatt anmutenden Oberfläche mikrostrukturelle Veränderungen zu sehen.



Kügler 2022

Bild 5.18: Veränderung der im Rasterelektronenmikroskop aufgenommenen Mikrostruktur durch Laserbestrahlung

Die Oberfläche wurde zudem im Querschnitt untersucht. Hierfür wurde an einer Probe im Rasterelektronenmikroskop ein FIB-Schnitt in die Oberfläche erzeugt. In **Bild 5.19** ist die mit Gallium beschichtete Fläche dargestellt, auf der der FIB-Schnitt positioniert wurde.

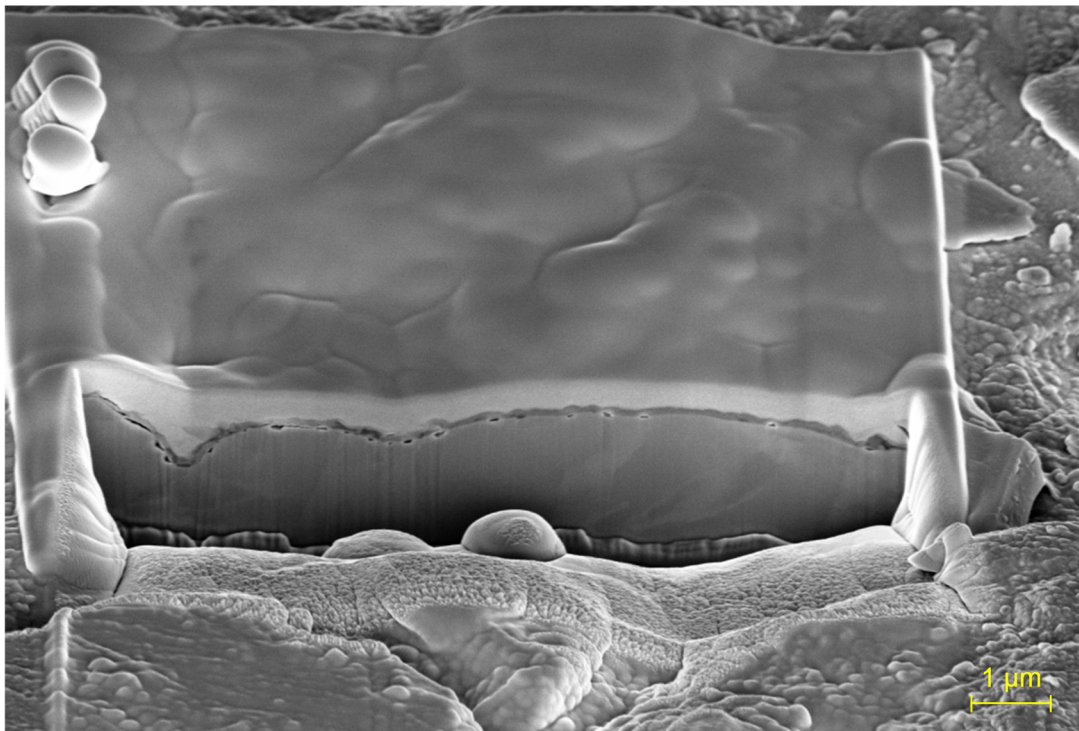


Bild 5.19: Übersichtsaufnahme des FIB-Schnitts auf der mit Gallium besputterten Fläche einer unbehandelten Probe

Bei der Untersuchung wurde eine Randschicht identifiziert. Die Messung der Randschichtdicke im Rasterelektronenmikroskop ist in **Bild 5.20** dargestellt. Die Messwerte an zwei Messstellen unterscheiden sich mit 89.77 nm und 149.6 nm um den Faktor 1.67. Neben der auffallenden Fluktuation der Randschichtdicke sind zudem Fehlstellen zwischen der Randschicht und dem Grundmaterial zu erkennen. Zudem sind Fehlstellen innerhalb der Randschicht erkennbar.

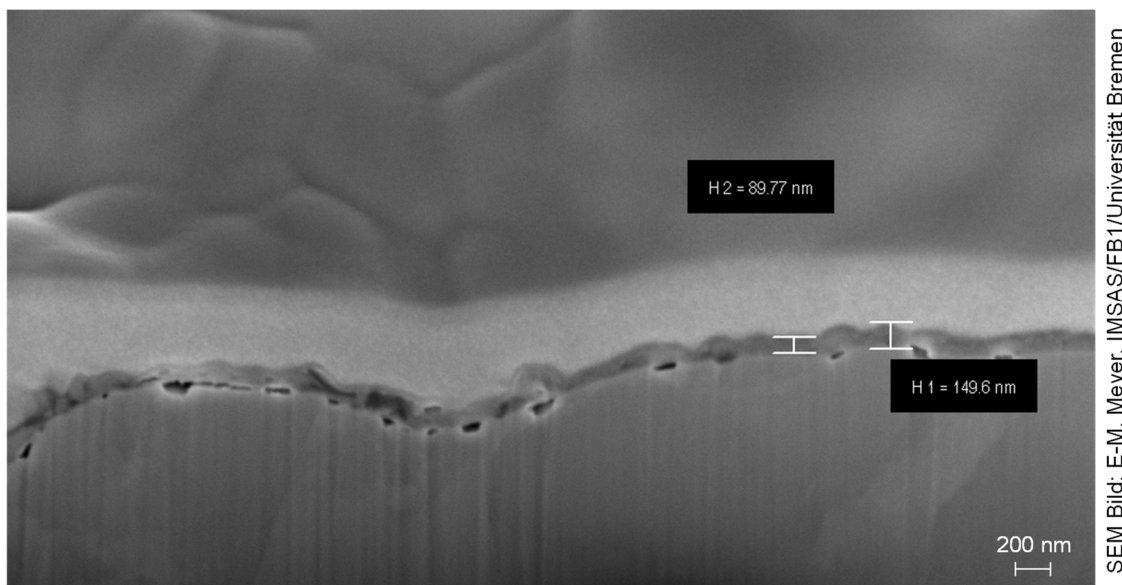


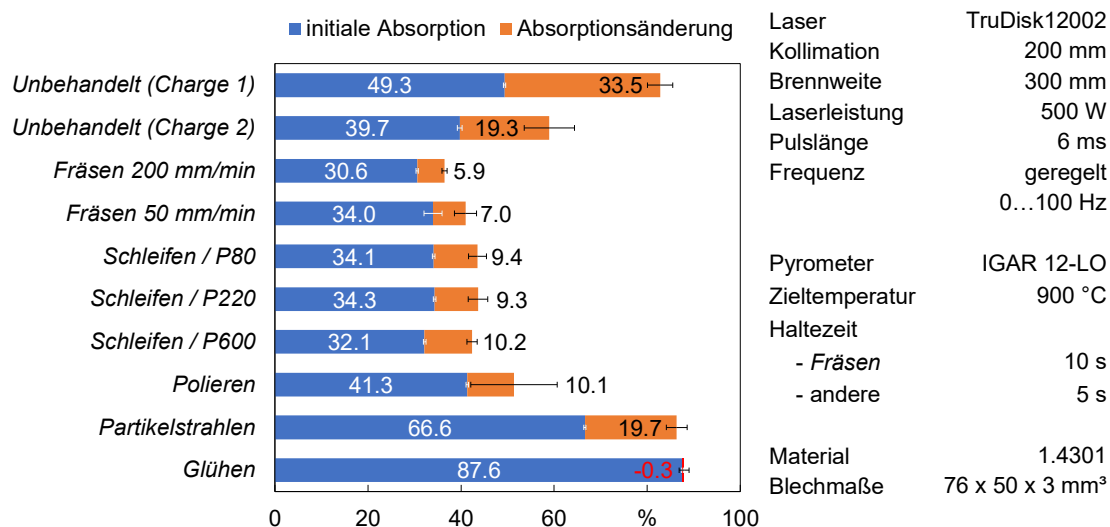
Bild 5.20: Messung der Randschichtdicke an einem durch einen FIB-Schnitt im Rasterelektronenmikroskop erzeugten Querschnitt der laserbestrahlten Proben

5.4.4 Absorptionsänderungen infolge temperaturgeregelter Punktbestrahlung

Durch die punktuelle und temperaturgeregelte Erwärmung mit einem Laserstrahl kann der Einfluss verschiedener Temperatur-Zeit-Profile auf die Absorptionsänderung untersucht werden. Hierbei zeigt sich, dass die Probenvorbehandlung nicht nur einen Einfluss auf die initiale Absorption, sondern auch auf die Veränderung der Absorptionswerte hat. In **Bild 5.21** sind die Absorptionswerte vor und nach der Laserbestrahlung für verschiedene Vorbehandlungen aufgeführt.

Bei der Vorbehandlung *Fräsen* wurden die geringsten Absorptionssteigerungen erzielt, wobei die Haltezeit mit 10 Sekunden doppelt so lang ausfiel wie bei den anderen Proben dieses Vergleichs. Gleichzeitig ist die initiale Absorption durch die Vorbehandlung geringer als die des Zustands *unbehandelt*.

Während sowohl unbehandelte Proben als auch Proben mit mechanischen Vorbehandlungen eine Absorptionssteigerung infolge Laserbestrahlung zeigen, wird die Absorption bei Proben mit der thermischen Vorbehandlung *Glühen* verringert. Der minimale Absorptionswert nach der Laserbestrahlung, der bei Proben mit der Vorbehandlung *Glühen* auftrat, ist 86.1 %.



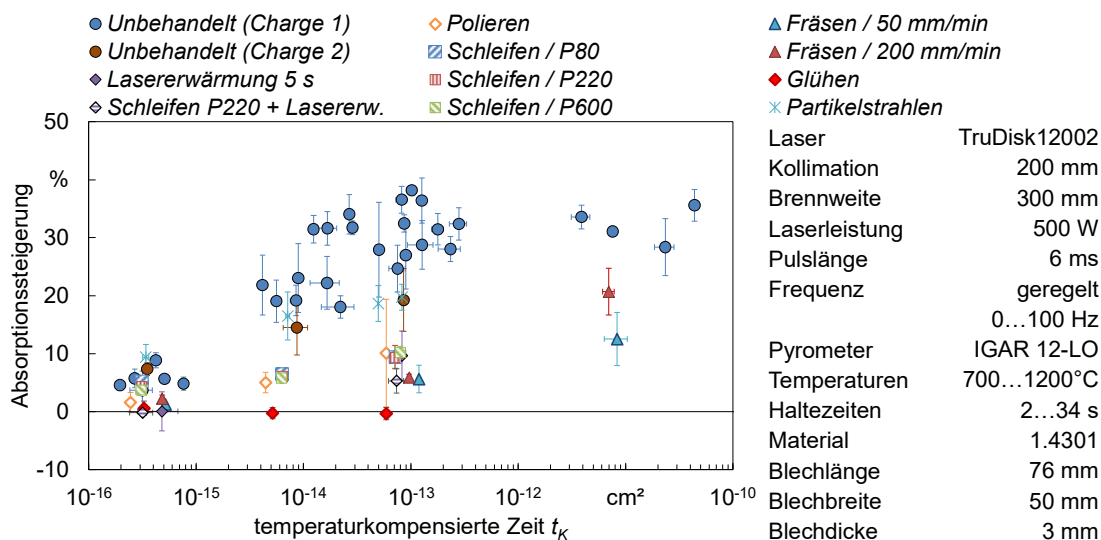
Kügler 2022

Bild 5.21: Darstellung des Einflusses der Probenvorbereitung auf die Absorptionsänderung mit weißen Zahlen für den initialen Absorptionszustand und schwarzen bzw. roten Zahlen für die jeweilige Änderung der Absorption

Die in **Bild 5.21** dargestellten Ergebnisse berücksichtigen die Zieltemperatur und Haltezeit. Der real erreichte Temperatur-Zeit-Verlauf wird dabei nicht berücksichtigt.

Mit der Bestimmung der temperaturkompensierten Zeit wird der Vergleich verschiedener Temperatur-Zeit-Verläufe ermöglicht. In **Bild 5.22** sind die Mittelwerte aller untersuchten Parameterkombinationen für Zieltemperatur und Haltedauer enthalten.

Abgesehen von den Proben mit der Vorbehandlung *Glühen* ist der Trend einer Absorptionssteigerung mit höheren temperaturkompensierten Zeiten zu erkennen. Die Steigungen der Absorptionsänderungen sind jedoch bei den verschiedenen Vorbehandlungen unterschiedlich. Bei den unbehandelten Proben der Charge 1 scheint die Absorptionssteigerung zudem begrenzt zu sein.



Kügler 2022

Bild 5.22: Darstellung der Absorptionsänderungen in Abhängigkeit der temperaturkompensierten Zeit

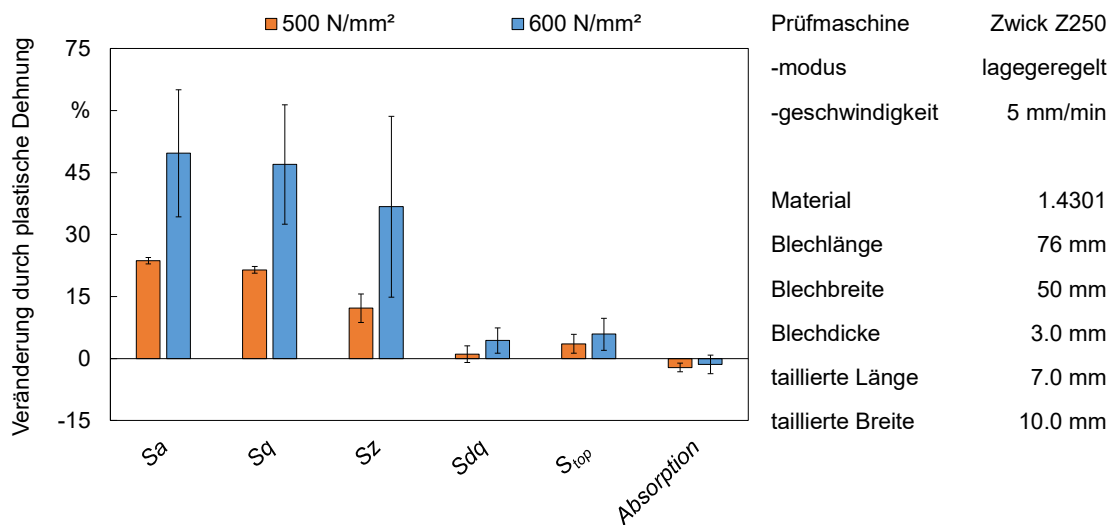
5.5 Auswirkung plastischer Verformung

Die Absorptions- und Rauheitsänderungen infolge rein plastischer Oberflächenveränderung wurden an taillierten Proben nach einer Beanspruchung mit Zugspannungen von 500 N/mm² und 600 N/mm² untersucht. Die Veränderungen durch die plastische Verformung der Proben ist in **Bild 5.23** dargestellt. Das Ergebnis zeigt, dass eine Rauheitszunahme infolge plastischer Verformung zu keiner Absorptionssteigerung führt.

Die Rauheitskennwerte S_a , S_q und S_z erhöhten sich infolge der Beanspruchung von 500 N/mm² zwischen 12 % und 24 %. Bei einer Beanspruchung von 600 N/mm² betrug die Veränderung zwischen 36 % und 50 %.

Für die Oberflächenkennwerte S_dq und S_{top} wurden ebenfalls höhere Mittelwerte berechnet, jedoch ist die Veränderung mit Steigerungen zwischen 1 % bis 6 % vergleichsweise gering.

Die Absorptionswerte wurden durch die plastische Verformung der Proben um durchschnittlich 2.1 % (bei 500 N/mm² Zugspannung) und 1.4 % (bei 600 N/mm² Zugspannung) verringert.



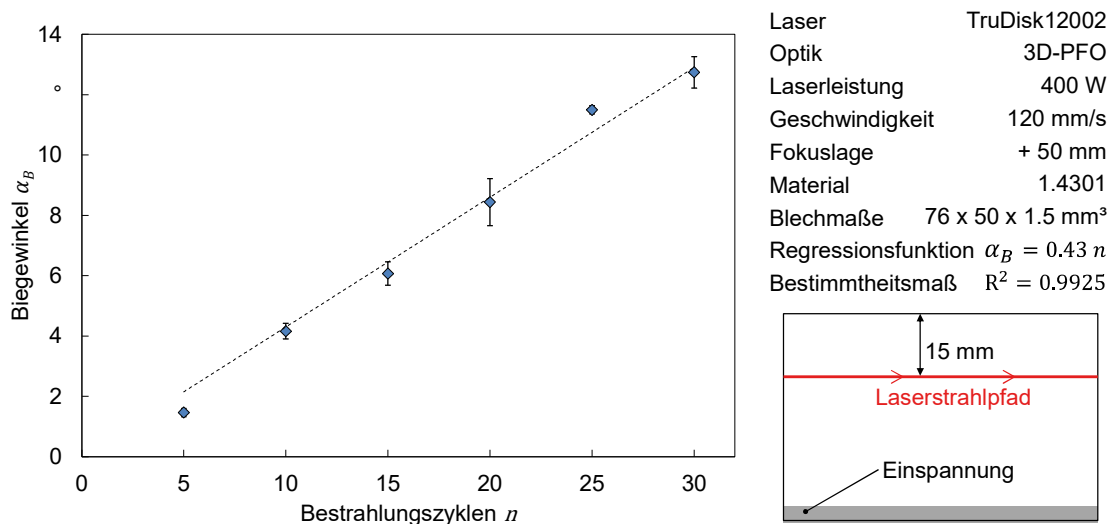
Kügler 2019

BIAS ID 190189

Bild 5.23: Prozentuale Veränderungen der Rauheits- und Topografiekenngößen sowie der Absorption bei plastisch verformten Proben infolge einer Zugbeanspruchung

5.6 Nutzung linearer Laserbestrahlung für einen Biegeprozess

Aus dem Stand der Forschung ist bekannt, dass Stahlbleche durch linear geführte Laserstrahlung zum Laserstrahl gebogen werden können. Dies geschieht durch den Temperaturgradientenmechanismus. In einem Experiment mit 1.5 mm dicken Stahlblechen konnte eine lineare Zunahme des Biegewinkels mit steigender Anzahl der Bestrahlungszyklen festgestellt werden. Dies ist in **Bild 5.24** dargestellt.



Kügler 2022

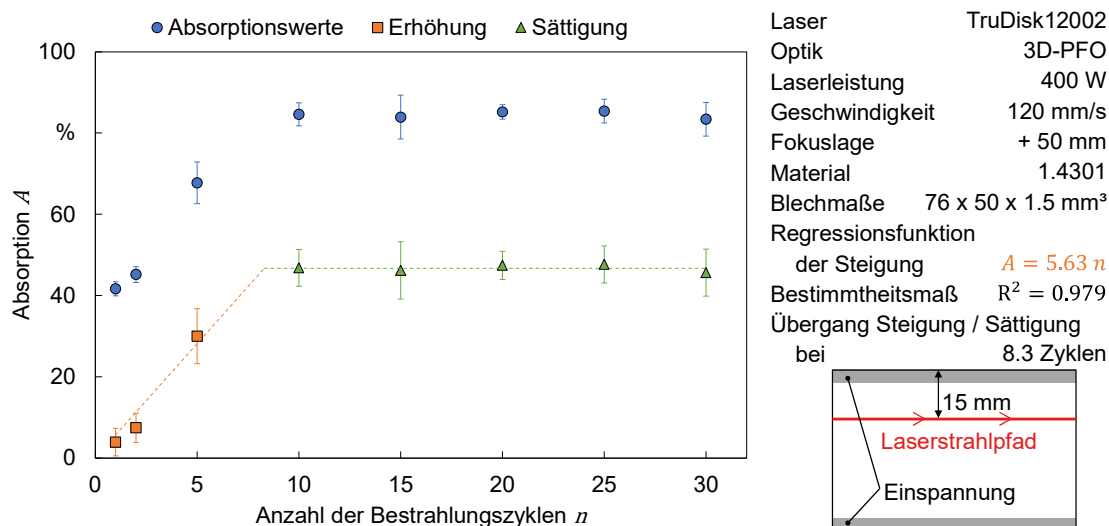
Bild 5.24: Darstellung des durch mehrfache lineare Laserbestrahlung erreichten Biegewinkels in Abhängigkeit der Bestrahlungshäufigkeit

Die Versuche zur Nutzung linearer Laserbestrahlung für einen Biegeprozess wurden mit einer beidseitigen Einspannung der Proben wiederholt. Die so unterdrückte Biegung der Proben ließ eine Absorptionsmessung zu. In **Bild 5.25** sind sowohl die Absorptionsmesswerte als auch die Steigerungen gegenüber der Ausgangsabsorption dargestellt. Die Messwerte für einen, zwei und fünf Bestrahlungszyklen zeigen einen Anstieg der Absorption mit zunehmender Bestrahlungshäufigkeit. Aus diesen Werten wurde eine Regressionsgerade ermittelt, deren Funktionsgleichung in Gleichung (5.1) dargestellt ist. Die resultierende Absorptionssteigerung ΔA ist dabei linear abhängig von der Anzahl der Bestrahlungszyklen n .

$$\Delta A = 5.63 n \quad (5.1)$$

Die weiteren Versuche mit zehn bis 30 Bestrahlungszyklen zeigen keine weitere Absorptionssteigerung. Der ermittelte Schnittpunkt dieses Sättigungslevel mit der Regressionsgeraden der Bestrahlungszyklen, die zu einer Absorptionssteigerung führten, liegt bei 8.3 Zyklen.

Für die initiale Absorption der 1.5 mm dicken Proben wurde ein Wert von $37.74 \pm 0.27 \%$ gemessen. Die aus der Regressionsgeraden berechnete Absorptionssteigerung für 8.3 Zyklen beträgt 46.76 %. Daraus ergibt sich ein Absorptionswert von 84.5 %, ab dem eine Absorptionssteigerung in einen gesättigten Zustand übergeht.



Kügler 2022

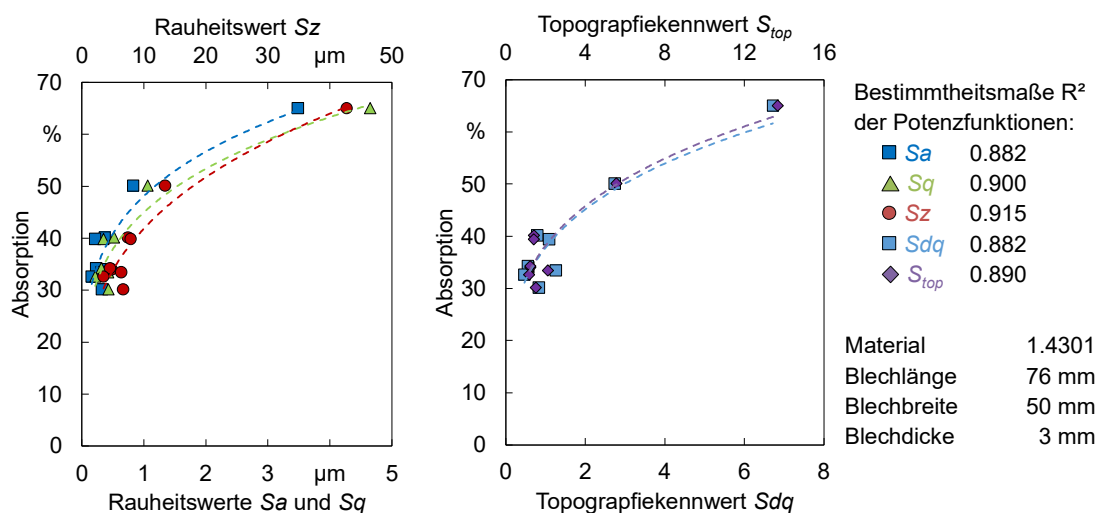
Bild 5.25: Absorptionswerte von Proben nach mehrfacher linearer Laserbestrahlung in Abhängigkeit der Bestrahlungshäufigkeit

6 Einflussfaktoren auf die Absorptionsänderung

Die dargestellten experimentellen Untersuchungen zeigen, dass die Absorption von Laserstrahlung wie auch deren Änderung sowohl von der Vorbehandlung als auch den Parametern der Laserbestrahlung abhängt (siehe **Bild 5.21**).

Für die Analyse des Einflusses verschiedener Vorbehandlungen wurden sowohl thermische als auch mechanische Vorbehandlungen eingesetzt. Zudem wurden Kombinationen dieser Vorbehandlungen untersucht (siehe **Bild 5.13**).

Die thermischen Vorbehandlungen *Glühen*, *Laserbehandlung 700°, 5s* und *Laserbehandlung 900°, 5s* haben eine erhöhte initiale Absorption, jedoch ist keine signifikante Änderung der Rauheitswerte gegenüber des jeweiligen unbehandelten Ausgangsmaterials erkennbar (siehe **Bild 5.14** und **Bild 5.15**). In **Bild 6.1** ist dargestellt, dass die durch mechanische Vorbehandlungen erzeugten Unterschiede der Rauheits- und Topografiekenwerte hingegen mit der initialen Absorption korrelieren.



Kügler 2022

Bild 6.1: Absorptionswerte unterschiedlicher mechanischer Vorbehandlungen vor der Laserbestrahlung in Abhängigkeit der initialen Rauheits- und Topografiekenwerte

Die Auswirkungen der Laserbestrahlung auf die Oberflächentopografie sind auf den ersten Blick jedoch nicht eindeutig. Bei der linearen Laserbestrahlung kann eine Veränderung der Rauheits- und Oberflächenkenwerte gemessen werden; bei den Untersuchungen mit punktueller Laserbestrahlung jedoch nicht.

Die Ergebnisse legen nahe, dass die kontinuierlichen Rauheitsänderungen infolge einer linearen Laserbestrahlung (siehe **Bild 5.4** und **Bild 5.5**) durch die thermisch bedingten

Formänderungen (siehe **Bild 5.3**) hervorgerufen werden, da eine derartige Formänderung weder bei den punktförmig bestrahlten (siehe **Bild 5.16** und **Bild 5.17**) noch den vollflächig erwärmten Proben (siehe **Bild 5.10** und **Bild 5.11**) derartig auftritt. Auch bei den Proben mit mehrfacher linearer Laserbestrahlung und einer Wartezeit von 5 s nach jedem Zyklus (siehe **Bild 5.6** und **Bild 5.7**) kann die kontinuierliche Zunahme der Rauheitskennwerte nicht bestätigt werden.

Die Rauheitsänderungen bei Proben linearer Laserbestrahlung gehen zwar mit Zunahme der Absorption einher (siehe **Bild 5.9**), jedoch unterliegen die Messwerte auffallend hohen Schwankungen. Bei den punktuellen Laserbestrahlungsversuchen, bei denen keine signifikante Rauheitsänderung auftrat (siehe **Bild 5.16** und **Bild 5.17**), konnte jedoch eine Absorptionssteigerung ermittelt werden (siehe **Bild 5.22**).

In der Literatur ist eine Korrelation zwischen den mittleren Rauheitswerten (wie S_a und S_q) und dem Absorptionsvermögen umstritten (siehe **Kapitel 2.2.4**). Der nach der Theorie von Agababov gebildete Topografiefaktor S_{top} zeigt eine übereinstimmende Tendenz bei den ofenerwärmten Proben (siehe **Bild 5.11**), jedoch ist keine eindeutige Tendenz bei den punktbestrahlten Proben zu erkennen (siehe **Bild 5.17**).

Die in den experimentellen Untersuchungen angewendeten Oberflächenvorbehandlungen beeinflussten nicht nur die initiale Absorption, sondern auch die Absorptionsänderung durch eine nachfolgende Laserbestrahlung (siehe **Bild 5.21**). Dabei wurden tendenziell höhere Absorptionssteigerungen bei höherer initialer Absorption festgestellt. Die Absorptionssteigerung scheint jedoch limitiert zu sein, da bei Proben der Vorbehandlung *Partikelstrahlen* trotz der höchsten initialen Absorption aller Proben mechanischer Vorbehandlung (66.6 %, siehe **Bild 5.21**) eine geringere Absorptionszunahme bei gleicher Temperatureinwirkung gemessen wurde als bei unbehandelten Proben der gleichen Charge (Charge 1, siehe **Bild 5.21**). Durch die thermische Vorbehandlung *Glühen* wird die Absorption zwar auf den höchsten initialen Wert gesteigert (87.6 %, siehe **Bild 5.21**), jedoch führt eine Temperatureinwirkung durch Laserbestrahlung zu keiner weiteren Absorptionssteigerung. Ein solcher Sättigungszustand kann auch bei linearen Laserbestrahlungsversuchen detektiert werden und liegt in den durchgeführten Untersuchungen bei 84.5 % (siehe **Bild 5.25**).

Neben der Beobachtung, dass eine herbeigeführte Absorptionssteigerung keine Rauheitsänderung bedingen muss, kann auch der gegenteilige Fall gezeigt werden. Eine Rauheitsänderung durch plastische Verformung führte zu keiner Absorptionssteigerung (siehe **Bild 5.23**).

Durch die Laserbestrahlung wird eine Beeinflussung der Mikrostruktur der Oberfläche hervorgerufen. In **Bild 5.18** ist die Veränderung der Oberfläche dargestellt. Eine vor der

Laserbestrahlung glatt anmutende Oberfläche zeigt nach der Temperatureinwirkung eine veränderte Oberflächenstruktur im Sub-Mikrometerbereich. Dieses Erscheinungsbild ähnelt dem von Sabioni et al. [124] beschriebenen, welches jedoch mit Partikelgrößen im Mikrometerbereich deutlich größer ist als die Partikel im Sub-Mikrometerbereich, die in **Bild 5.18** dargestellt sind. Es ist anzunehmen, dass der Größenunterschied der Strukturen mit dem Unterschied der Temperatureinwirkung zusammenhängt. Statt der im Experiment verwendeten 900 °C für 2 Sekunden wurden die Proben von Sabioni et al. [124] für 96 Stunden einer Temperatur von 800 °C ausgesetzt.

In den Untersuchungen von Vesel et al. [114] wurden Proben in einem Luftplasma für 5 Sekunden einer Temperatur zwischen 600 K und 1250 K ausgesetzt. Die in **Bild 5.18** dargestellten Strukturen liegen im optischen Vergleich zwischen denen von Vesel et al. [114] beschriebenen Strukturen bei Temperaturen von 600 K und 800 K.

Die Randschichtstruktur, die anhand eines FIB-Schnitts im Rasterelektronenmikroskop sichtbar gemacht wurde (siehe **Bild 5.20**), ähnelt den in der Literatur dargestellten Aufnahmen einer Oxidschicht (z.B. [111]). Die von Lawrence et al. gemessene Oxidschicht zeichnet sich jedoch durch eine größere Gleichmäßigkeit aus, was auch durch die deutlich dickere Schicht (mittlere Dicke von 405 nm) begründet sein kann.

Vergleichsversuche mit Argon als Schutzgas führten zu keiner Absorptionsänderung (siehe **Kapitel 5.1**).

Aufgrund der Versuchsdurchführung an Luft und der Übereinstimmung der Veränderungen der Oberflächentopografie im Sub-Mikrometerbereich mit den im Stand der Forschung beschriebenen Beobachtungen kann geschlussfolgert werden, dass eine Absorptionssteigerung infolge einer Laserbestrahlung durch das Wachstum einer Oxidschicht hervorgerufen wird. Die Oxidschichtdicke ist, wie in **Bild 5.20** dargestellt, lokal unterschiedlich.

Aus dem Stand der Forschung (siehe **Kapitel 2.3.1**) geht hervor, dass sowohl Oxide des Typs Fe_2O_3 als auch Cr_2O_3 bei der Oxidation des verwendeten Werkstoffs entstehen (z.B. [121]). Die Absorptionseigenschaften von Laserstrahlung dieser Oxide wurden in der Literatur an Proben verschiedener Beschaffenheiten und Herstellungsverfahren untersucht.

Für eine Cr_2O_3 -Oxidschicht ermittelten Abedi und Gollo [96] für raue Oberflächen ($R_a = 1.9 \mu\text{m}$) eine maximale Absorption zwischen 90 % und 91 %; für glattere Proben ($R_a = 0.7 \mu\text{m}$) resultierten Absorptionsgrade zwischen 83.72 % und 86.76 %.

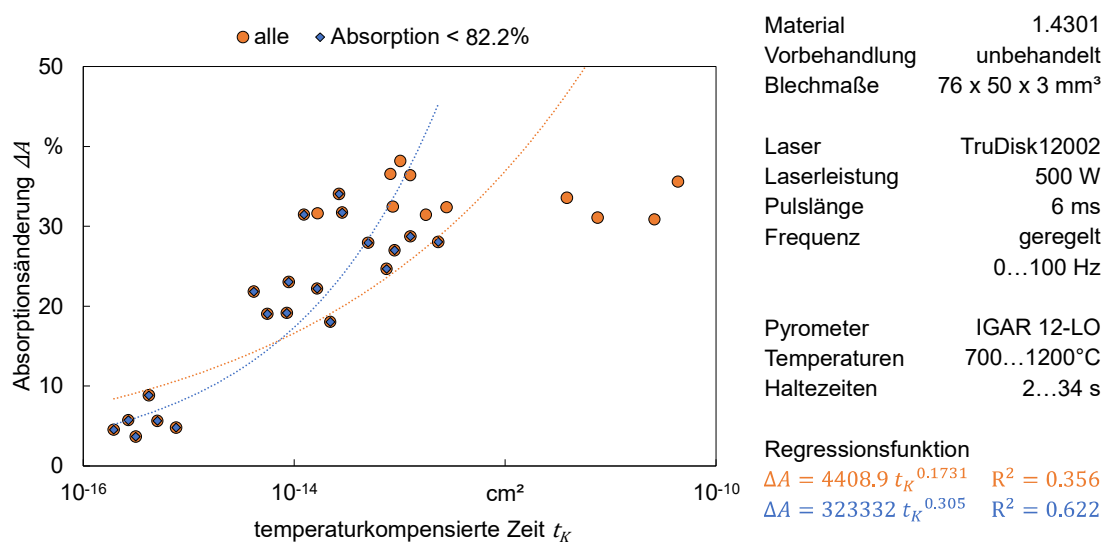
Aus Untersuchungen an Sputtertargets konnte ein Absorptionswert von 81.9 % für das Oxid Cr_2O_3 ermittelt werden [95]. Aus den optischen Koeffizienten, die an durch Ver-

dampfung abgeschiedene Schichten ermittelt wurden, kann ein Absorptionswert von 85.2 % bestimmt werden [134].

Für eine Fe_2O_3 -Oxidschicht geben Karlsson und Ribbing einen Absorptionswert von 79.2 % an [134]. Aus den von Query ermittelten Konstanten lässt sich eine Absorption von 86.15 % berechnen [137].

Die in **Kapitel 5.6** ermittelte Schwelle, ab der ein Sättigungszustand der Absorptionssteigerung bei Biegeversuchen auftritt, liegt mit 84.5 % im Bereich der in der Literatur angegebenen Absorptionswerte für die beim Werkstoff 1.4301 auftretenden Oxidschichten.

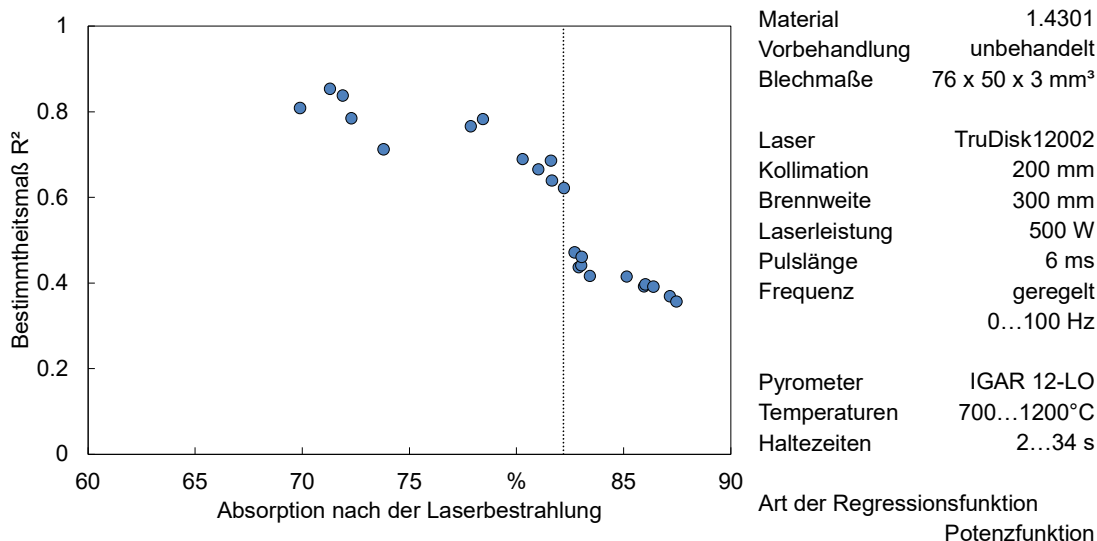
Die Darstellung aller Absorptionsänderungen bei punktbestrahlten Proben ohne Vorbehandlung in **Bild 6.2** zeigt ebenfalls, dass ein Sättigungseffekt auftritt. Die Sättigungsschwelle ist anhand dieser Darstellung jedoch nicht eindeutig festzulegen.



Kügler 2022

Bild 6.2: Darstellung aller punktbestrahlten Proben ohne Vorbehandlung mit Regressionsfunktionen für alle Proben (orange Kreise) und allen Proben mit einem resultierenden Absorptionswert bis zu einem Sättigungswert von 82.2 % (blaue Rauten)

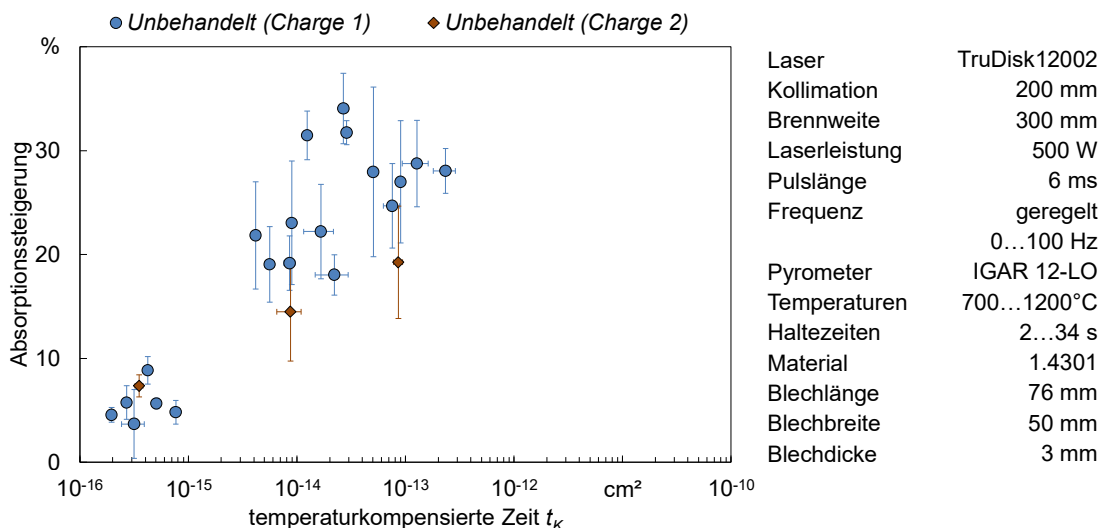
Die Messwerte aus **Bild 6.2** lassen sich mit einer Regressionsfunktion beschreiben. Hierfür wurde eine Potenzfunktion gewählt. Eine Darstellung des jeweiligen Bestimmtheitsmaß R^2 für Regressionen verschiedener Sättigungsschwellen liefert **Bild 6.3**. Daraus lässt sich entnehmen, dass zwischen den Messwerten 82.2 % und 82.7 % für die resultierende Absorption nach der Laserbestrahlung das Bestimmtheitsmaß der Regressionsfunktion von 0.62 auf 0.47 abnimmt.



Kügler 2022

Bild 6.3: Darstellung des Bestimmtheitsmaßes der Regressionsfunktion aus **Bild 6.2** (gestrichelte Vertikale bei einer Absorption von 82.2 %) in Abhängigkeit des gewählten Sättigungswerts bis zu dem die punktbestrahlten Proben berücksichtigt werden

Die in **Bild 5.22** dargestellten Messwerte beinhalten auch Proben mit einer Absorptionssteigerung im Bereich der Sättigung des Oxidschichteinflusses. Eine um die gesättigten Proben bereinigte Darstellung der unbehandelten Proben der ersten Charge wird in **Bild 6.4** gezeigt.



Kügler 2022

Bild 6.4: Absorptionssteigerung laserbestrahlter Proben ohne Vorbehandlung mit einem resultierenden Absorptionswert bis zur Sättigungsschwelle des Oxidschichteinflusses von 82.2 %.

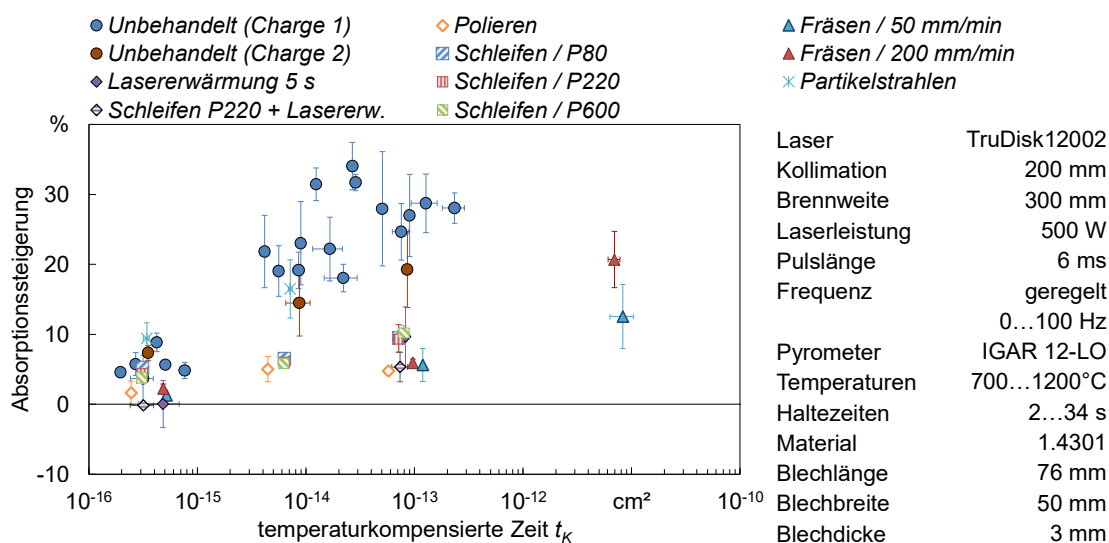
Die dargestellten Ergebnisse lassen die Schlussfolgerung zu, dass die Rauheitsänderungen nach der Laserbestrahlung nicht ursächlich für die Absorptionssteigerung sind, sondern die Oxidation der Proben diese hervorruft. Es

wurden sowohl Rauheitsänderungen erzeugt, die in keiner Absorptionssteigerung resultierten, als auch Absorptionssteigerungen bei Proben ohne Rauheitsänderung gemessen.

Einer Analyse der Absorptionsänderungen lässt sich entnehmen, dass diese nicht kontinuierlich gesteigert werden kann, sondern eine Sättigungsschwelle von 82.2 % für die Proben aus dem verwendeten Werkstoff 1.4301 bestimmt werden kann.

7 Vorhersagbarkeit der Absorptionsänderung

Die in **Bild 5.22** dargestellten Messwerte der Absorptionssteigerung bei Proben unterschiedlicher Vorbehandlung in Abhängigkeit der temperaturkompensierten Zeit können ebenfalls um die als gesättigt angesehenen Proben bereinigt dargestellt werden. In **Bild 7.1** sind alle Proben mit einer resultierenden Absorption bis zur in **Kapitel 6** ermittelten Sättigungsschwelle von 82.2 % dargestellt.



Kügler 2022

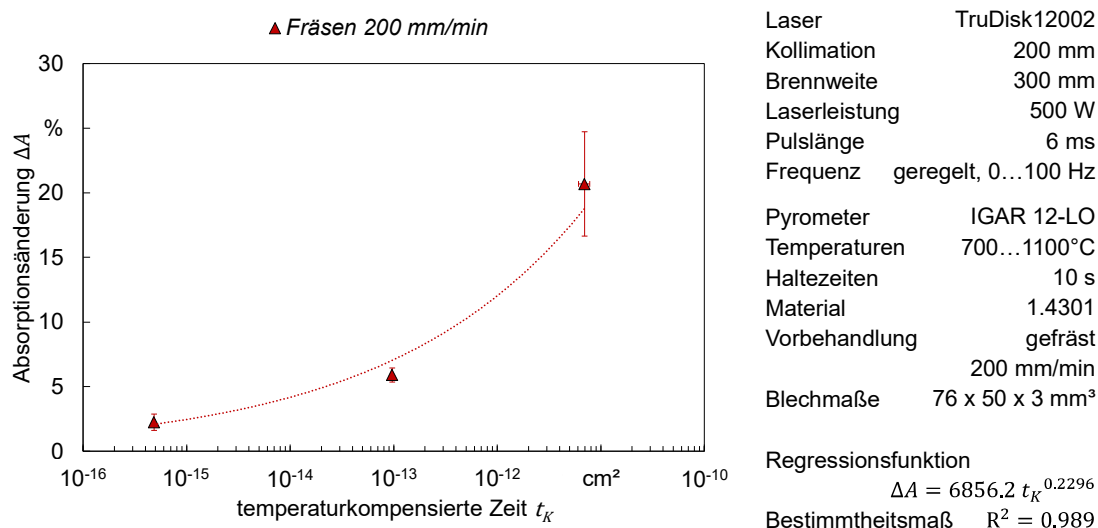
Bild 7.1: Absorptionssteigerungen laserbestrahlter Proben mit einer resultierenden Absorption bis zur Sättigungsschwelle des Oxidschichteinflusses von 82.2 %.

Die Verläufe der Absorptionsänderungen in Abhängigkeit der einwirkenden temperaturkompensierten Zeit stehen in dieser Darstellung der nicht gesättigten Proben je Vorbehandlung in keinem erkennbaren Zusammenhang. Die aufgeführten Proben unterscheiden sich dabei teilweise in der thermischen und teilweise in der mechanischen Bearbeitungshistorie.

Durch die Betrachtung der in **Bild 5.13** aufgeführten initialen Absorptionswerte kann die Vorbehandlung des Fräsens der Probenoberfläche mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 200 mm/min als diejenige mit minimalem initialen Absorptionswert identifiziert werden. Den in **Kapitel 6** hergeleiteten Erkenntnissen zufolge wird angenommen, dass der Oxidationszustand dieser Proben durch das mechanische Entfernen der Oberfläche in einem geringeren beeinflussten Zustand vorliegt als bei den Proben anderer Vorbehandlungen. Gleichzeitig werden für Proben mit der Vorbehandlung *Fräsen 200 mm/min* die geringsten mittleren Rauheitswerte ermittelt.

Die Erwartung, dass die polierten Proben die minimale initiale Absorption aufweisen, kann nicht bestätigt werden. Bei der Präparation wurden unbehandelte Proben verwendet. Die Oberfläche lag demnach in einem Zustand undefinierter Bearbeitungshistorie vor. Die Oxidation kann somit durch den Herstellungsprozess des Blechs und die Lagerbedingungen vor Beschaffung erfolgt sein. Durch das Polieren wurde die Oberfläche modifiziert, jedoch ist eine Entfernung der Oxidation nicht definitiv gewährleistet. Bei der Vorbehandlung des Fräsens hingegen wird die Oxidationsschicht sicher entfernt. Die danach einsetzende Oxidation der neuen Oberfläche ist bei Kontakt mit sauerstoffhaltiger Atmosphäre nicht zu vermeiden, jedoch wird durch die kürzere Lagerdauer von der Fräsbearbeitung zur punktuellen Laserbestrahlung ein untereinander vergleichbarer Zustand geringer Oxidation erreicht.

Im Folgenden wird die Arbeitshypothese untersucht, dass die initialen Absorptionswerte der unterschiedlichen Vorbehandlungen auch als eine Kombination aus der Vorbehandlung *Fräsen 200 mm/min* und einer zusätzlichen Temperaturbehandlung beschrieben werden kann. Es gilt daher, die temperaturkompensierte Zeit zu ermitteln, die benötigt würde, um den initialen Absorptionswert der jeweiligen Vorbehandlung mit einer gefrästen Probenoberfläche (Vorschubgeschwindigkeit 200 mm/min) zu erreichen. In **Bild 7.2** ist der Verlauf der Absorptionsänderung infolge punktförmiger Bestrahlung von Proben mit der Vorbehandlung *Fräsen 200 mm/min* dargestellt. Unter Zuhilfenahme der ermittelten Regressionsfunktion können temperaturkompensierte Zeiten bestimmt werden, die den initialen Absorptionswerten der anderen Vorbehandlungen entsprechen.



Kügler 2020

Bild 7.2: Absorptionsänderung infolge punktueller Laserbestrahlung von Proben, die zur Vorbehandlung mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 200 mm/min gefräst wurden.

Die mit den Daten in **Bild 7.2** ermittelte Regressionsfunktion kann mit der Gleichung (7.1) beschrieben werden.

$$\Delta A_{\text{Fräsen } 200 \text{ mm/min}} = f(t_K) = 6856.2 t_K^{0.2296} \quad (7.1)$$

In **Tabelle 7.1** sind die mit der Regressionsfunktion aus Gleichung (7.1) berechneten äquivalenten temperaturkompensierten Zeiten $t_{K,vor}$ je Vorbehandlung aufgelistet, die aufgewendet werden müssten, um den Absorptionswert einer Probe der Vorbehandlung *Fräsen 200 mm/min* durch eine Temperaturbehandlung auf den initialen Absorptionswert der genannten Vorbehandlung zu bringen. Die dargestellten Werte beschreiben die äquivalente temperaturkompensierte Zeit $t_{K,vor}$ für die Mittelwerte der initialen Absorptionen aller Proben einer jeden Vorbehandlung.

Tabelle 7.1: Auflistung der äquivalenten temperaturkompensierten Zeiten $t_{K,vor}$ je Vorbehandlungen

Vorbehandlung	Initiale Absorption A_0	Differenz zu <i>Fräsen 200 mm/min</i> ΔA_{vor}	Äquivalente temperaturkompensierte Zeit $t_{K,vor}$
<i>Unbehandelt (Charge 1)</i>	50.1 %	19.7 %	$8.52 * 10^{-12} \text{ cm}^2$
<i>Unbehandelt (Charge 2)</i>	40.1 %	9.8 %	$4.07 * 10^{-13} \text{ cm}^2$
<i>Fräsen 50 mm/min</i>	33.9 %	4.2 %	$1.02 * 10^{-14} \text{ cm}^2$
<i>Polieren</i>	39.4 %	9.2 %	$3.09 * 10^{-13} \text{ cm}^2$
<i>Partikelstrahlen</i>	61.6 %	31.2 %	$6.31 * 10^{-11} \text{ cm}^2$
<i>Glühen</i>	87.9 %	57.6 %	$9.11 * 10^{-10} \text{ cm}^2$
<i>Schleifen / P80</i>	34.0 %	3.6 %	$5.19 * 10^{-15} \text{ cm}^2$
<i>Schleifen / P220</i>	34.2 %	3.9 %	$7.36 * 10^{-15} \text{ cm}^2$
<i>Schleifen / P600</i>	32.6 %	2.3 %	$7.38 * 10^{-16} \text{ cm}^2$
<i>Laserbehandlung 700 °C 5s</i>	48.2 %	17.9 %	$5.61 * 10^{-12} \text{ cm}^2$
<i>Laserbehandlung 700 °C 5s</i>	59.5 %	29.1 %	$4.66 * 10^{-11} \text{ cm}^2$
<i>Schleifen P220 + Laserbehandlung 700 °C 5s</i>	39.2 %	8.8 %	$2.55 * 10^{-13} \text{ cm}^2$
<i>Schleifen P220 + Laserbehandlung 900 °C 5s</i>	42.7 %	12.3 %	$1.09 * 10^{-12} \text{ cm}^2$

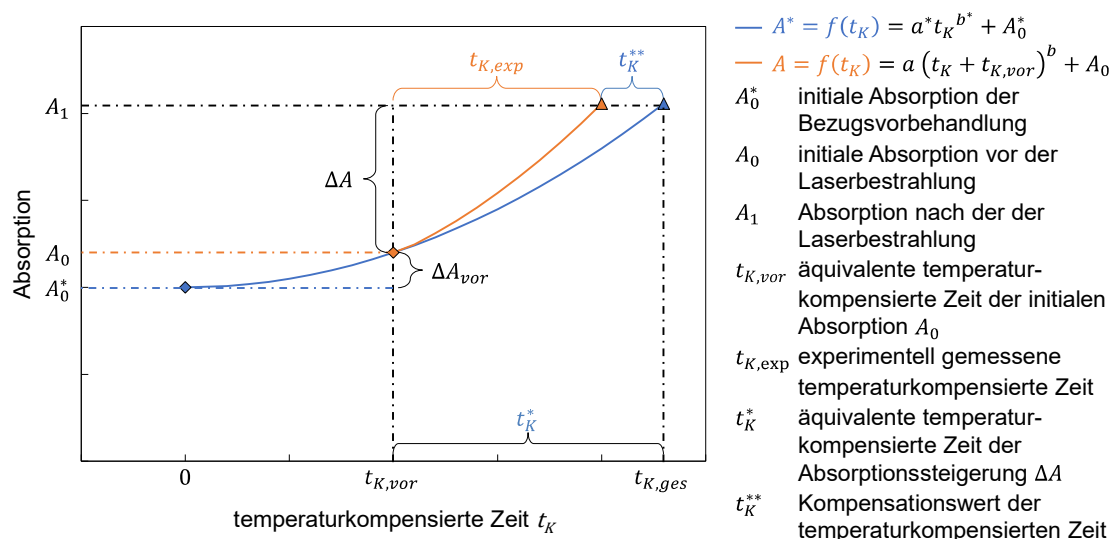
Eine Zusammenführung der äquivalenten temperaturkompensierten Zeit und der danach aufgebrauchten thermischen Beeinflussung durch eine punktuelle Laserbestrahlung wird angestrebt. Eine direkte Addition dieser temperaturkompensierten Zeiten ist nicht zielführend, da Proben, die bereits eine Absorptionssteigerung erfahren haben, auf die anschließende Temperatureinwirkung mit einer höheren Absorptionssteigerung reagieren. In **Bild 5.21** ist aufgeführt, dass Proben höherer initialer Absorption bei vergleichbarer

Temperatureinwirkung höhere Absorptionssteigerungen erfahren, sofern der Sättigungszustand noch nicht erreicht ist.

Um eine Gesamtbetrachtung zu ermöglichen, wird die Arbeitshypothese aufgestellt, dass die Absorptionssteigerung infolge einer Temperatureinwirkung durch den in Gleichung (7.2) dargestellten Zusammenhang einer Potenzfunktion in Abhängigkeit der temperaturkompensierten Zeit beschrieben werden kann.

$$\Delta A = f(t_K) = a * (t_K)^b \quad (7.2)$$

Die Parameter a und b beschreiben dabei die durch die Vorbehandlung des Materials beeinflusste spezifische Änderungsrate. In **Bild 7.3** ist dargestellt, dass die unterschiedlichen Parameter der Regressionsfunktionen zu unterschiedlichen Änderungsraten der Absorption führen.



Kügler 2022

Bild 7.3: Darstellung der Berechnung einer gesamten temperaturkompensierten Zeit $t_{K,ges}$ durch die Bestimmung des Kompensationswerts t_K^{**} und der Addition mit der äquivalenten temperaturkompensierten Zeit der Vorbehandlung $t_{K,vor}$ und dem experimentell gemessenen Betrag $t_{K,exp}$

Die gemessene Absorptionsänderung kann mit der Funktion in Gleichung (7.3) beschrieben werden.

$$\Delta A = A - A_0 = a (t_{K,exp})^b \quad (7.3)$$

Eine auf den Vorbehandlungszustand *Fräsen 200 mm/min*, der hierbei als Bezugsvorbehandlung verwendet wird, umgerechnete Absorptionsänderung kann mit der Gleichung (7.4) beschrieben werden. Die Absorptionsänderung ΔA_{ges} setzt sich dabei gemäß Gleichung (7.5) aus dem experimentell ermittelten Wert der Absorptionssteigerung durch die Laserstrahlbearbeitung ΔA und der initialen Absorptionsdifferenz zwischen

der Vorbehandlung *Fräsen 200 mm/min* und der vorliegenden Vorbehandlung ΔA_{vor} zusammen. Die Werte für die initiale Absorptionsdifferenz sind in **Tabelle 7.1** aufgelistet.

$$\Delta A_{ges} = a^* t_{K,ges}^{b^*} \quad (7.4)$$

$$\Delta A_{ges} = \Delta A + \Delta A_{vor} = \Delta A + A_0 - A_0^* \quad (7.5)$$

Die mit einem Stern gekennzeichneten Parameter beschreiben jeweils Parameter der auf den Vorbehandlungszustand *Fräsen 200 mm/min* umgerechneten Absorptionsänderung.

Ausgehend von der initialen Absorption einer Probe kann die experimentell gemessene Absorptionssteigerung auf zwei Wegen beschrieben werden. Einerseits wird die Absorptionssteigerung durch die Potenzfunktion der jeweiligen Vorbehandlung gemäß Gleichung (7.3) beschrieben, wobei die experimentell gemessene temperaturkompensierte Zeit $t_{K,exp}$ und die Koeffizienten a und b verwendet werden.

Andererseits kann die gleiche Absorptionssteigerung durch die Einwirkung einer anderen temperaturkompensierten Zeit t_K^* mit den auf die Bezugsvorbehandlung bezogenen Koeffizienten a^* und b^* beschrieben werden. Dies ist in Gleichung (7.6) dargestellt.

$$\Delta A = A_1 - A_0 = a^* t_K^{*b^*} \quad (7.6)$$

Da für Proben höherer initialer Absorption höhere Absorptionssteigerungen gemessen werden, sind die Koeffizienten a und b für jede Vorbehandlung individuell. Die im Experiment gemessene temperaturkompensierte Zeit $t_{K,exp}$ muss aufgrund der unterschiedlichen Koeffizienten a und b für die Absorptionssteigerung gegenüber der Bezugsvorbehandlung um einen Betrag korrigiert werden, um eine Darstellung aller Absorptionsänderungen in Abhängigkeit einer gesamten temperaturkompensierten Zeit $t_{K,ges}$ unabhängig von der jeweiligen Vorbehandlung zu ermöglichen. Dieser Kompensationswert wird wie in **Bild 7.3** beschrieben t_K^{**} genannt.

Die temperaturkompensierte Zeit t_K^* , die theoretisch benötigt wird, um die experimentell ermittelte Absorptionssteigerung mit einer Probe der Bezugsvorbehandlung zu erreichen, lässt sich nun gemäß Gleichung (7.7) als Summe der experimentell gemessenen temperaturkompensierten Zeit $t_{K,exp}$ und des Kompensationswerts t_K^{**} darstellen.

$$t_K^* = t_{K,exp} + t_K^{**} \quad (7.7)$$

Durch Einsetzen dieses Zusammenhangs in Gleichung (7.6) ergibt sich der in Gleichung (7.8) dargestellte Zusammenhang.

$$\Delta A = a^* (t_{K,exp} + t_K^{**})^{b^*} \quad (7.8)$$

Die zwei Darstellungen der Absorptionssteigerung ΔA , die in Gleichung (7.3) und Gleichung (7.8) dargestellt sind, lassen sich wie in Gleichung (7.9) dargestellt gleichsetzen.

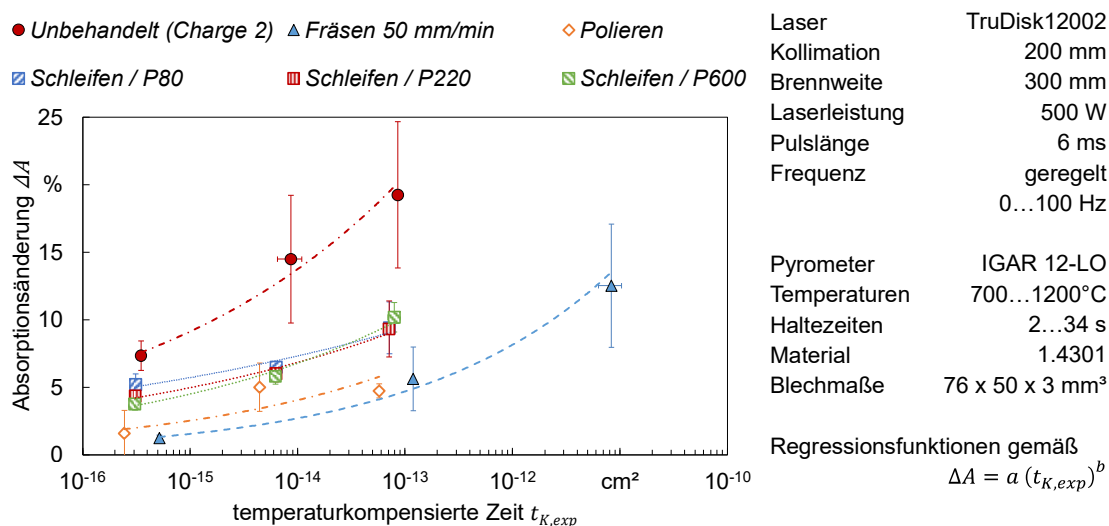
$$a t_{K,exp}^b = a^* (t_{K,exp} + t_K^{**})^{b^*} \quad (7.9)$$

Umgestellt nach dem Kompensationswert der temperaturkompensierten Zeit t_K^{**} ergibt sich Gleichung (7.10).

$$t_K^{**} = \left(\frac{a}{a^*}\right)^{\frac{1}{b^*}} t_{K,exp}^{\frac{b}{b^*}} - t_{K,exp} \quad (7.10)$$

Um die Koeffizienten der Absorptionssteigerung a und b der verschiedenen Vorbehandlungen zu bestimmen, werden Regressionsfunktionen je Vorbehandlung wie in **Bild 7.4** dargestellt, gebildet. Für die Regressionsfunktionen wurde eine Potenzfunktion angenommen, wie sie in Gleichung (7.2) dargestellt ist.

Hierbei wurden nur Proben mit einem resultierenden Absorptionswert unterhalb des Sättigungszustands von 82.2 % (siehe **Kapitel 6**) verwendet.



Kügler 2022

Bild 7.4: Darstellung der Absorptionszunahmen von Proben mit resultierender Absorption unterhalb der Sättigungsschwelle und deren Regressionsfunktionen

Die ermittelten Koeffizienten a und b der in **Bild 6.2**, **Bild 7.2** und **Bild 7.4** dargestellten Regressionsfunktionen sind für die verschiedenen Vorbehandlungen in **Tabelle 7.2** aufgelistet.

Tabelle 7.2: Auflistung der charakteristischen Koeffizienten a und b der Regressionsfunktionen je Vorbehandlung

Vorbehandlung	Vorfaktor a	Exponent b	Bestimmtheitsmaß R^2
Unbehandelt (Charge 1)	323331.6	0.3050	0.622
Unbehandelt (Charge 2)	4197.2	0.1775	0.976
Fräsen 50 mm/min	6067.5	0.2393	0.989
Fräsen 200 mm/min	6856.2	0.2296	0.989
Polieren	2876.2	0.2036	0.568
Schleifen / P80	232.1	0.1072	0.960
Schleifen / P220	604.1	0.1389	0.979
Schleifen / P600	2104.2	0.1780	0.987
Laserbehandlung 5s	4197.2	0.1775	0.976
Schleifen P220 + Laserbehandlung 5s	604.1	0.1389	0.989

Für die Vorbehandlungen *Partikelstrahlen* können anhand der Messwerte keine Koeffizienten ermittelt werden, da nicht ausreichend Messwerte mit einer resultierenden Absorption unterhalb der in **Kapitel 6** festgelegten Sättigungsschwelle von 82.2 % liegen, um eine Regressionsfunktion aufstellen zu können.

Für die Vorbehandlung *Glühen* können keine Koeffizienten der Absorptionssteigerung berechnet werden, da diese Proben bereits nach der Vorbehandlung Absorptionswerte im Bereich der Sättigung aufwiesen. Die gemessenen Absorptionsänderungen liegen unter 0.6 % werden daher als Messunsicherheit interpretiert. Für diese Proben gilt

$$\Delta A \approx 0 \quad (7.11)$$

Daraus ergibt sich, dass die Absorptionsänderung ΔA_{ges} einzig von der Absorptionssteigerung durch die Vorbehandlung abhängt.

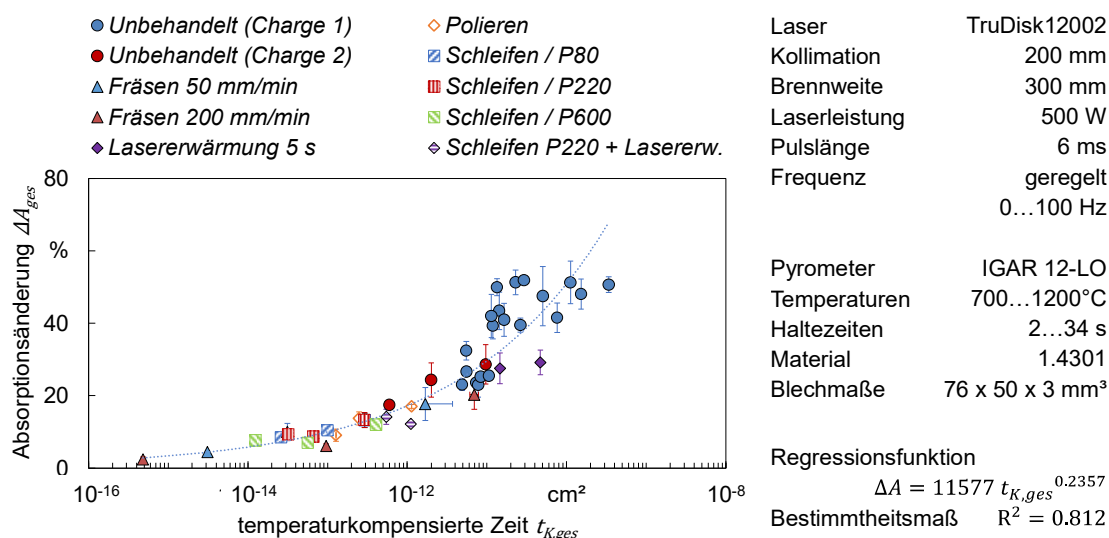
$$\Delta A_{ges} = \Delta A_{vor} \quad (7.12)$$

Der Gesamtbetrag der temperaturkompensierten Zeit $t_{K,ges}$ ist dadurch ebenfalls nur durch die äquivalente temperaturkompensierte Zeit bestimmt.

$$t_{K,ges} = t_{K,vor} \quad (7.13)$$

Für die thermischen Vorbehandlungen mit dem Laserstrahl (Vorbehandlung *Laserbehandlung 700°, 5s* und *Laserbehandlung 900°, 5s*) sowie die kombinierten Vorbehandlungen *Schleifen P220 + 700°, 5s* und *Schleifen P220 + 900°, 5s* wurden die Koeffizienten a und b von der Ausgangsoberfläche von den jeweiligen Grundzuständen (*Unbehandelt (Charge 2)* und *Schleifen / P220*) verwendet, da anzunehmen ist, dass die Absorptionssteigerung durch eine weitere Laserbestrahlung der gleichen Steigerungsrate folgt.

Durch die Bestimmung der Kompensationswerte der temperaturkompensierten Zeit t_K^{**} gemäß Gleichung (7.10) kann eine gesamte temperaturkompensierte Zeit $t_{K,ges}$ berechnet werden. In **Bild 7.5** ist die gesamte auf die Bezugsvorbehandlung *Fräsen 200 mm/min* bezogene Absorptionsänderung ΔA_{ges} in Abhängigkeit der gesamten temperaturkompensierten Zeit $t_{K,ges}$ dargestellt. Es kann gezeigt werden, dass ein Zusammenhang der Absorptionssteigerungen infolge punktueller Laserbestrahlungen unabhängig von der Vorbehandlung besteht, wobei sowohl thermische als auch mechanische Vorbehandlungen eingeschlossen werden.



Kügler 2022

Bild 7.5: Absorptionssteigerungen laserbestrahlter Proben mit einer resultierenden Absorption unter der festgelegten Sättigungsschwelle von 82.2 % korrigiert um den Einfluss der jeweiligen Vorbehandlung

Die in **Bild 7.5** genannte Regressionsfunktion bezieht sich auf alle Proben unabhängig von der Vorbehandlung.

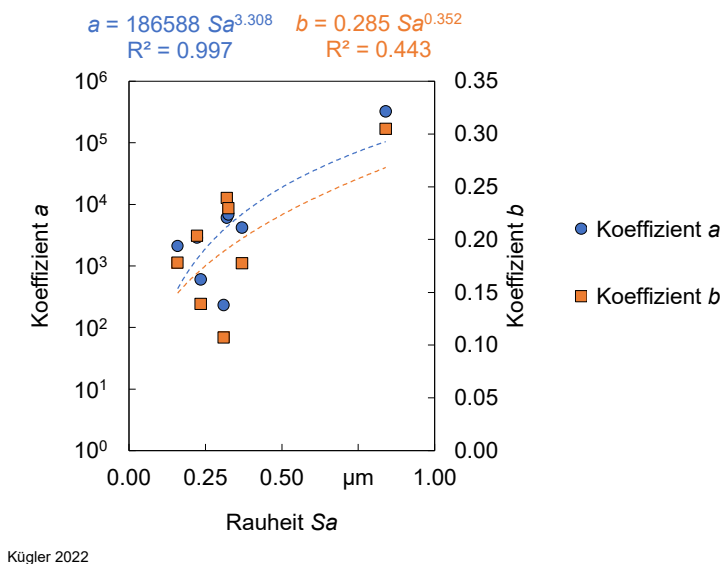
Die dargestellte Abhängigkeit zeigt, dass die Absorptionssteigerung durch thermische Einwirkung vorhergesagt werden kann, sofern der Temperatur-Zeit-Verlauf während der Bearbeitung gemessen wird und die Vorbehandlung und die damit verbundenen Koeffizienten a und b bekannt sind.

Die Bestimmung der Koeffizienten a und b wurde durch Laserbestrahlungsversuche und Absorptionsmessungen ermittelt und sind in **Tabelle 7.2** aufgelistet. Die Koeffizienten können jedoch auch in Abhängigkeit der Rauheits- und Topografiekenwerte dargestellt werden.

Die Korrelation der Rauheitskennwerte mit den Koeffizienten a ist in allen Fällen über Werten von 0.99 für das Bestimmtheitsmaß R^2 . Die Regressionsfunktionen für den Koeffizienten b zeigen jedoch eine unzureichende Korrelation mit den Rauheitswerten

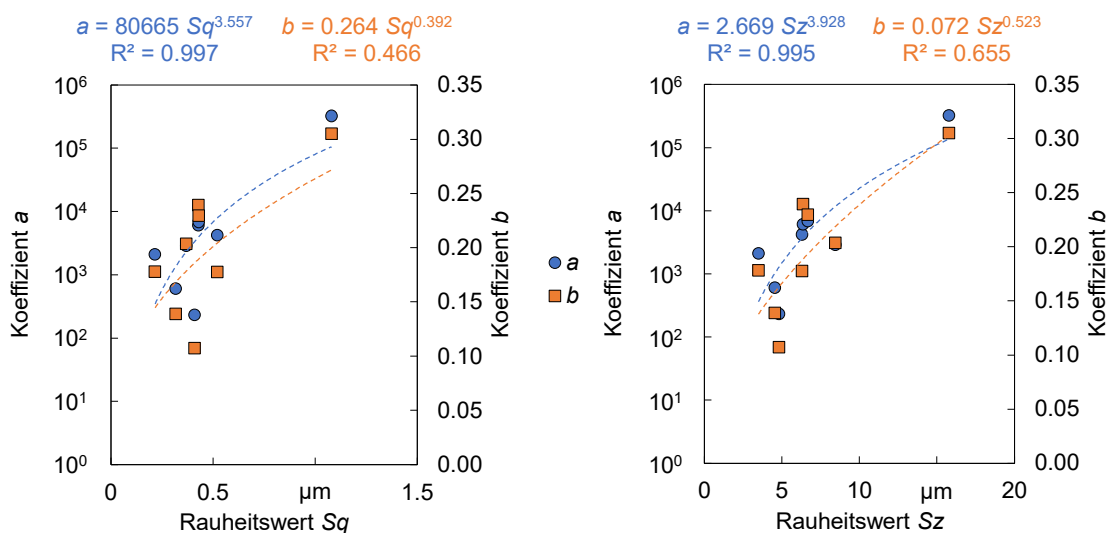
Sa (siehe **Bild 7.6**) und Sq (siehe **Bild 7.7**) sowie der initialen Absorption A_0 (siehe **Bild 7.9**).

Die ermittelte Korrelation der Regressionsfunktion für den Koeffizienten b in Abhängigkeit der Rautiefe Sz ist dagegen mit einem Wert von $R^2 = 0.655$ signifikant höher (siehe **Bild 7.7**).



Kügler 2022

Bild 7.6: Darstellung der Abhängigkeit der Absorptionssteigerungskoeffizienten a und b von dem Rauheitskennwert Sa



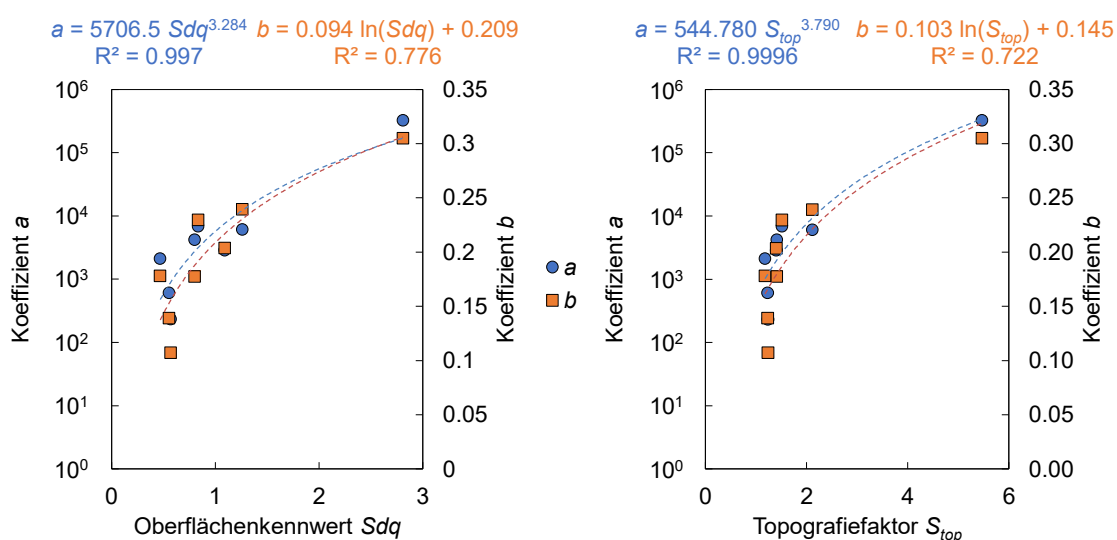
Kügler 2022

Bild 7.7: Darstellung der Abhängigkeiten der Absorptionssteigerungskoeffizienten a und b von den Rauheitskennwerten Sq und Sz

In **Bild 7.8** ist die Abhängigkeit der Koeffizienten a und b von dem hybriden Rauheitskennwert Sdq und dem Topografiefaktor S_{top} dargestellt. Beide Kennwerte sind ein Maß

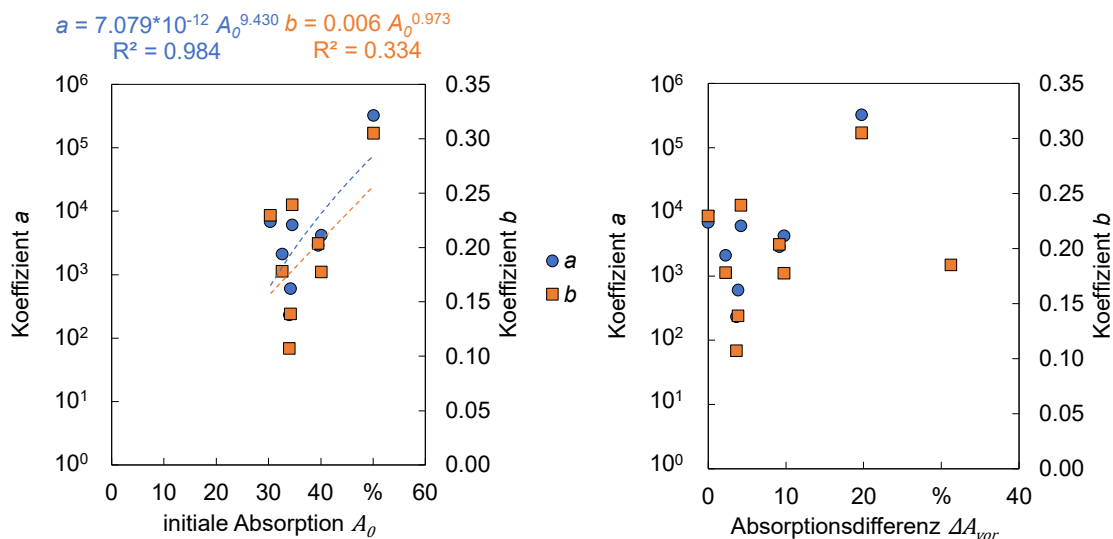
für die effektive Fläche, die während der Laserstrahlbearbeitung bestrahlt wird. Für die Regressionsfunktionen dieser beiden Kennwerte für den Koeffizienten b ergeben sich höhere Korrelationskoeffizienten R^2 , wenn eine logarithmische Funktion anstatt einer Potenzfunktion angenommen wird. Dies ist bei den anderen Kennwerten nicht der Fall.

Mit der Absorptionsdifferenz ΔA_{vor} , welche die Differenz zwischen der initialen Absorption einer Probe und der initialen Absorption der Bezugsvorbehandlung *Fräsen 200 mm/min* beschreibt, lässt sich weder für den Koeffizienten a noch b eine Korrelation herstellen (siehe **Bild 7.9**).



Kügler 2022

Bild 7.8: Darstellung der Abhängigkeiten der Absorptionssteigerungskoeffizienten a und b von den Kennwerten Sdq und S_{top}



Kügler 2022

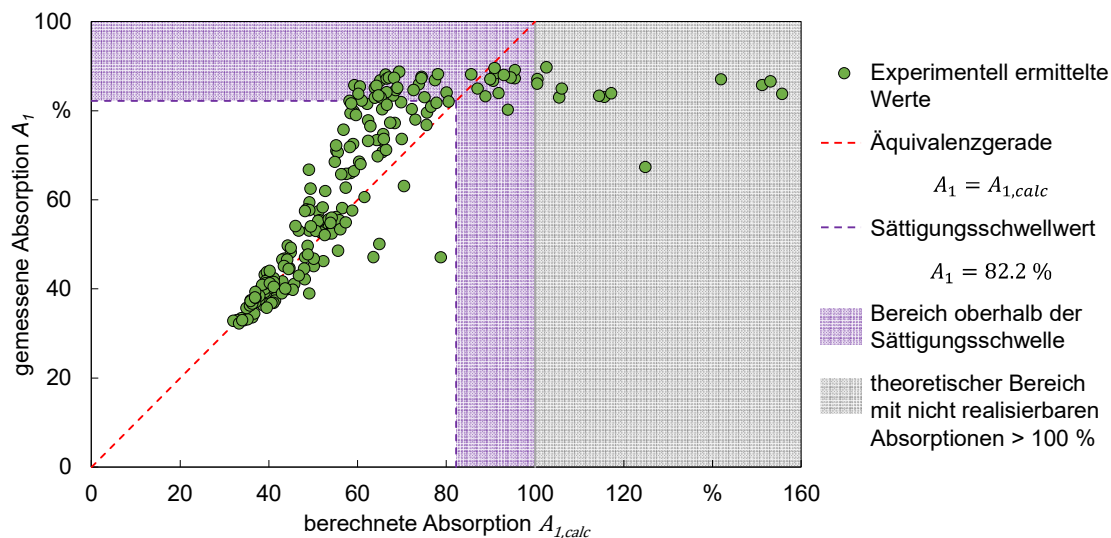
Bild 7.9: Darstellung der Abhängigkeiten der Absorptionssteigerungskoeffizienten a und b von der initialen Absorption A_0 sowie der Absorptionsdifferenz ΔA_{vor}

Für die Berechnung der resultierenden Absorptionswerte anhand eines Werkstückkennwerts wird der quadratische Neigungsmittelwert Sdq gewählt, da die Korrelation der Regressionsfunktion insbesondere für den Koeffizienten b höher ist als bei den anderen Oberflächen- oder Absorptionskennwerten (siehe **Bild 7.8**).

Der resultierende Absorptionswert nach einer Temperatureinwirkung A_1 kann, abgeleitet von Gleichung (7.3), mit der Gleichung (7.14) beschrieben werden. Dabei werden die Koeffizienten a und b als Funktion des quadratischen Neigungsmittelwerts Sdq berechnet und sind damit abhängig von der durch die Vorbehandlung entstandenen Oberfläche.

$$A_{1,calc} = \Delta A + A_0 = a(Sdq) t_{K,exp}^{b(Sdq)} + A_0 \tag{7.14}$$

Ein Vergleich der gemessenen Absorptionswerte nach einer Temperatureinwirkung zu den nach Gleichung (7.14) berechneten Absorptionswerten ist in **Bild 7.10** dargestellt.



Kügler 2022

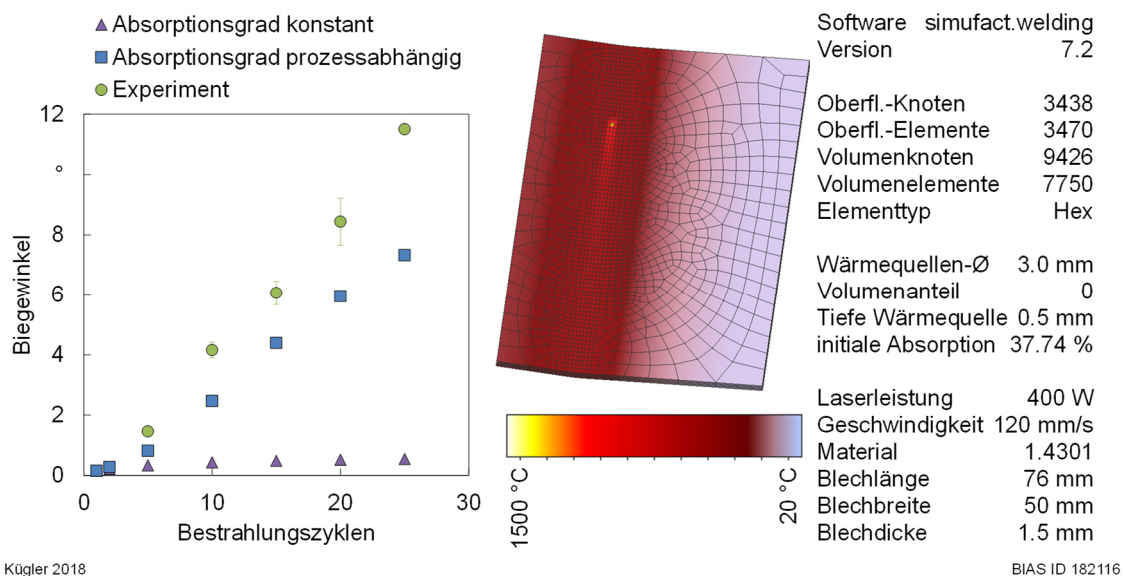
Bild 7.10: Vergleich der gemessenen Absorption A_1 nach einer Temperatureinwirkung mit der nach Gleichung (7.14) berechneten Absorption $A_{1,calc}$

Die ermittelten Regressionsfunktionen für die Koeffizienten a und b ermöglichen demnach eine Vorhersage der von der Oberfläche abhängigen Absorptionssteigerungsrate dieses Werkstoffs infolge einer thermischen Beanspruchung ohne Kenntnis der vorherigen Temperatureinwirkungen und/oder mechanischen Vorbehandlungen. Einzig die Ausgangsrauheit A_0 und der quadratische Neigungsmittelwert Sdq müssen vor der Temperatureinwirkung bekannt sein, um die resultierende Absorption in Abhängigkeit des Temperatur-Zeit-Verlaufs berechnen zu können.

8 Nutzen prozessabhängiger Absorptionsgrade für numerische Simulationen

Der prozessabhängige Absorptionsgrad wurde mit der experimentell bestimmten Regressionsgeraden (siehe **Gleichung (5.1)** auf Seite 70) in eine numerische Simulation eines Laserbiegeprozesses von nichtrostenden Stahlblechen des Werkstoffs 1.4301 mit der auch in **Kapitel 5.6** verwendeten Blechdicke von 1.5 mm implementiert. Die Simulation wurde, wie in **Kapitel 4.5** beschrieben, mit der Software `simufact.welding` durchgeführt.

In **Bild 8.1** werden die Berechnungsergebnisse der erzeugten Biegewinkel für eine variierende Anzahl an linearen Bestrahlungszyklen im Vergleich zum Ergebnis des Experiments dargestellt. Ein konstanter, dem Ausgangszustand von 37.7 % entsprechender Absorptionsgrad resultiert dabei mit zunehmender Zyklenzahl in einem deutlich geringeren Biegewinkel als bei einem prozessabhängigen Absorptionsgrad. Der prozessabhängige Absorptionsgrad bildet hingegen die Tendenz des Biegewinkelverlaufs der experimentellen Versuche ab.



Kügler 2018

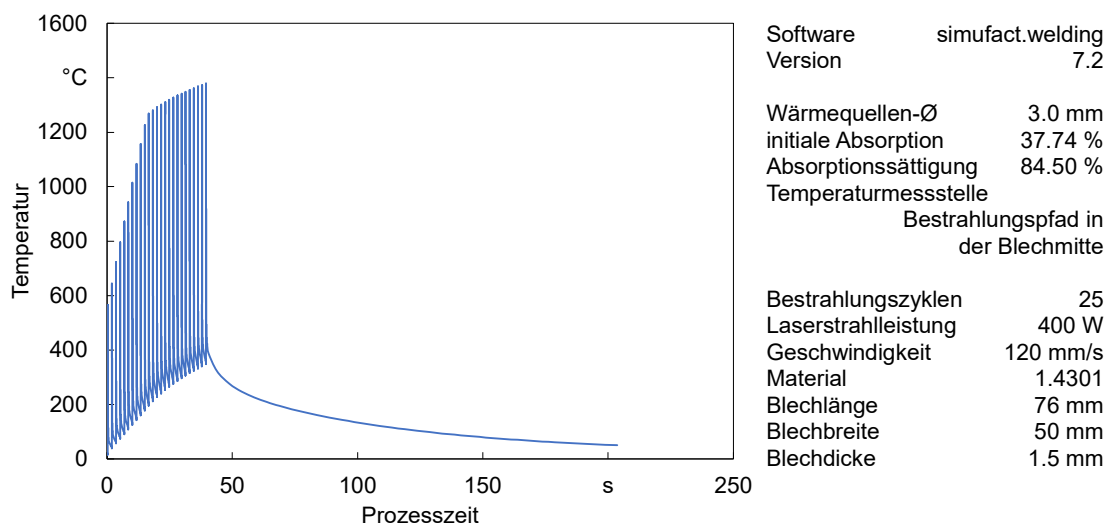
BIAS ID 182116

Bild 8.1: Vergleich der simulierten Biegewinkel mit konstantem und prozessabhängigem Absorptionsgrad

Durch das Ergebnis der Simulation wird verdeutlicht, dass ein als konstant angenommener Absorptionsgrad bei numerischen Simulationen die Auswirkungen der Bestrahlung unterschätzt. Um dieses Verhalten zu kompensieren, müsste ein höherer konstanter Absorptionsgrad gewählt werden, wodurch jedoch bei geringen Bestrahlungszyklen die

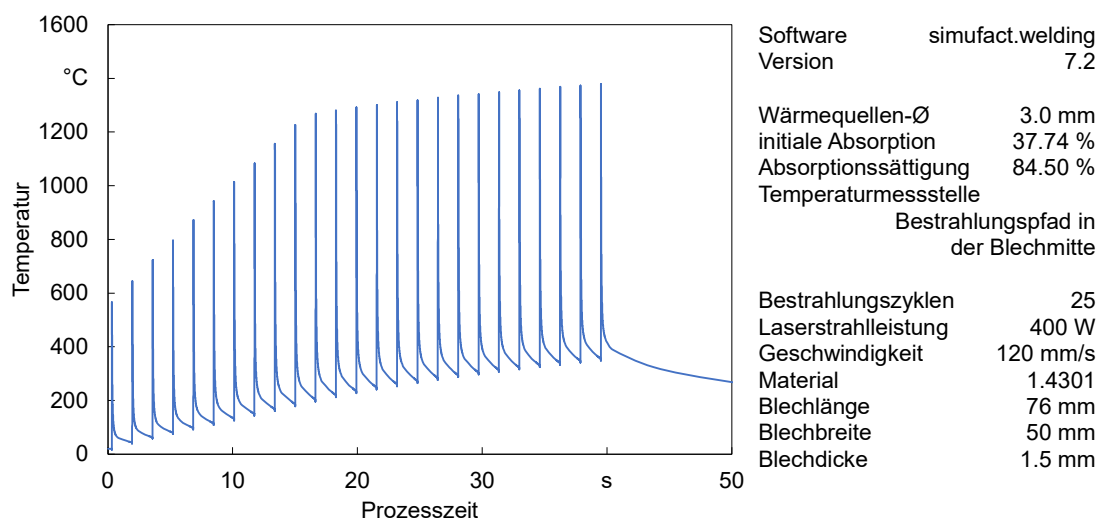
Auswirkungen überschätzt würden. Vor allem in Bezug auf die Skalierbarkeit der Bestrahlungszyklen ist ein prozessabhängiger Absorptionsgrad somit vorteilhaft.

Aus dem Simulationsergebnis des Laserstrahlbiegeprozesses mit prozessabhängigem Absorptionsgrad kann der Temperaturverlauf an einer beliebigen Messstelle extrahiert werden. **Bild 8.2** zeigt den Temperaturverlauf über die Prozessdauer eines simulierten Laserstrahlbiegeprozesses von 25 Zyklen, wobei als Temperaturmessstelle die Mitte des Laserbestrahlungspfads gewählt wurde. In **Bild 8.3** ist der Temperaturverlauf ohne den Abkühlprozess dargestellt.



Kügler 2022

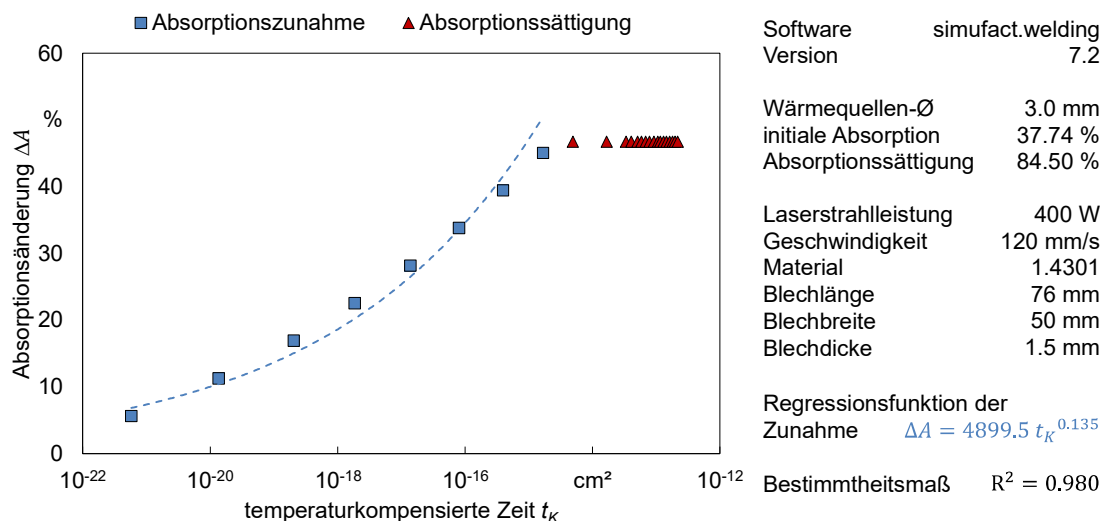
Bild 8.2: Simulierter Temperaturverlauf eines Laserstrahlbiegeprozesses



Kügler 2022

Bild 8.3: Simulierter Temperaturverlauf (Ausschnitt ohne Abkühlungsverlauf) eines Laserstrahlbiegeprozesses

Aus diesem Temperaturverlauf lässt sich analog zu den experimentellen Messdaten eine temperaturkompensierte Zeit berechnen. In **Bild 8.4** ist die experimentell ermittelte Absorptionssteigerung beim Laserstrahlbiegeversuch in Abhängigkeit der simulierten temperaturkompensierten Zeit dargestellt. Für die Absorptionssteigerung, die für die Simulation verwendet wurde, wurde im Experiment ein linearer Anstieg mit der Anzahl der Bestrahlungszyklen ermittelt (siehe **Gleichung (5.1)**). Die Absorptionsänderung in Abhängigkeit der temperaturkompensierten Zeit lässt sich, analog zu den experimentellen Absorptionszunahmen infolge temperaturgeregelter Punktbestrahlung (siehe **Bild 7.4**), mit einer Potenzfunktion beschreiben. Aus diesen in **Bild 8.4** dargestellten Daten können die Koeffizienten a und b bestimmt werden, womit der Kompensationswert bei der Bestimmung der gesamten temperaturkompensierten Zeit berechnet werden kann.



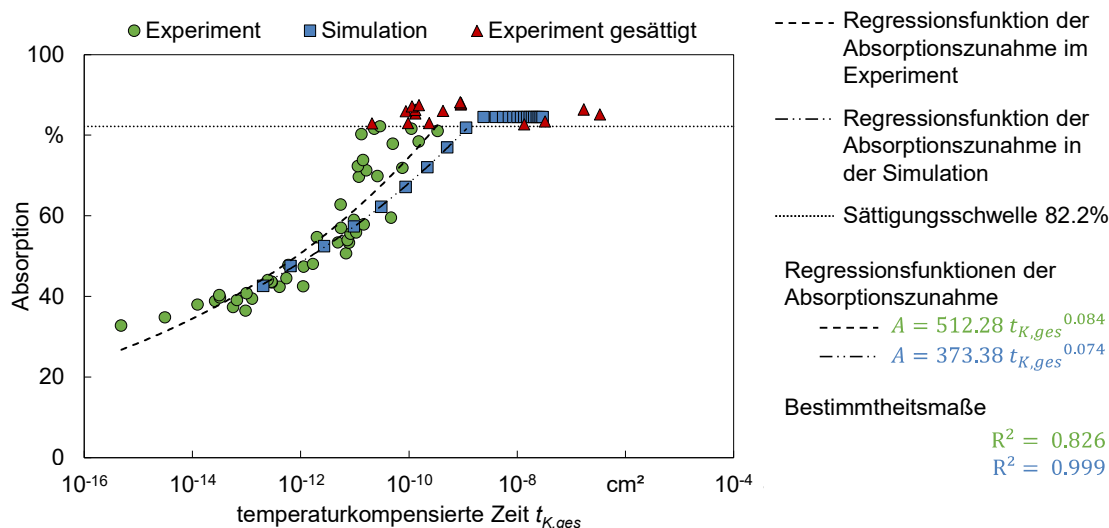
Kügler 2022

Bild 8.4: Absorptionsänderung in Abhängigkeit der aus der Simulation ermittelten temperaturkompensierten Zeit

Die so ermittelten Werte können zu der Darstellung der Absorptionssteigerungen aller laserbestrahlten Proben mit einer resultierenden Absorption unter der festgelegten Sättigungsschwelle von 82.2 %, die um den Einfluss der jeweiligen Vorbehandlung korrigiert wurden (siehe **Bild 7.5**), hinzugefügt werden. Der Übersichtlichkeit halber wurde bei der gemeinsamen Darstellung experimenteller und simulierter Daten der Absorptionswerte über die gesamte temperaturkompensierte Zeit in **Bild 8.5** auf die Unterscheidung der Probenvorbehandlung bei den experimentellen Proben verzichtet. Die Datenpunkte der Simulation sind insbesondere bei höheren resultierenden Absorptionswerten zu höheren gesamten temperaturkompensierten Zeiten verschoben.

Diese Beobachtung könnte durch die unterschiedlichen Temperaturabtastraten begründet sein. Während beim Experiment der punktuellen temperaturgeregelten Werkstoff-

ferwärmung die Temperaturerfassung des Pyrometers mit 20 Hz (siehe **Kapitel 4.2.1**) kurzzeitig höhere Temperaturen, die bei der Berechnung der temperaturkompensierten Zeit den Gesamtbetrag erhöhen würden, nicht detektieren konnte, werden diese bei der Simulation mit durchschnittlich 6024 Hz (siehe **Kapitel 4.5**) erfasst und miteinander.

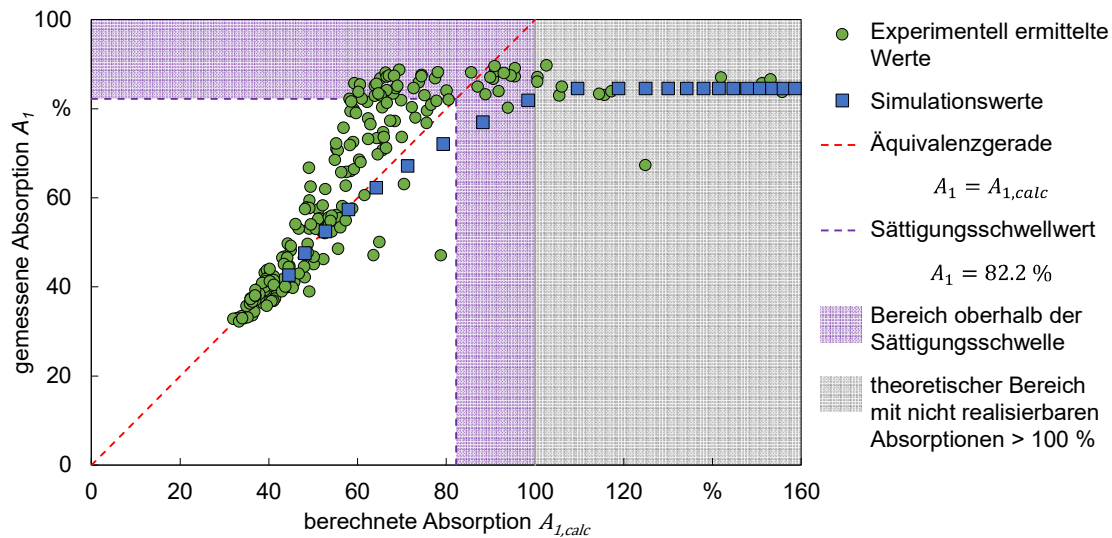


Kügler 2022

Bild 8.5: Absorptionswerte simulierter und experimenteller Proben in Abhängigkeit der gesamten temperaturkompensierten Zeit

Ebenfalls kann der in **Bild 7.10** aufgeführte Vergleich der gemessenen Absorption zur berechneten Absorption um die Ergebnisse der Simulation erweitert werden. Die Darstellung in **Bild 8.6** zeigt, dass die aus den Koeffizienten a und b sowie der aus Simulationsdaten ermittelten temperaturkompensierten Zeit berechneten Absorptionswerte stets größer sind als die im Biegeversuch (siehe **Kapitel 5.6**) gemessenen Absorptionswerte. Diese Abweichung könnte ebenfalls durch nicht erfasste Temperaturspitzen im Experiment, bedingt durch eine limitierte Temperaturerfassungsrates, begründet sein.

Die größte Abweichung ergibt sich in diesem Fall bei der Simulation von sieben Bestrahlungszyklen. Die berechnete Absorption liegt mit 79.3 % über der gemessenen Absorption von 72.0 %. Für die weiteren Bestrahlungszyklen werden Absorptionswerte berechnet, die oberhalb der Sättigungsschwelle liegen.



Kügler 2022

Bild 8.6: Vergleich der experimentell ermittelten (in grün) und simulierten (in blau) Absorptionswerte nach einer Temperatureinwirkung A_1 mit der nach Gleichung (7.14) berechneten Absorption $A_{1,calc}$

Durch die Korrelation der berechneten Absorption, die über die aus der Simulation entnommenen temperaturkompensierten Zeit und der gemessenen Absorptionssteigerungsrate des Biegeversuchs ermittelt wurde, mit den experimentellen Daten aller Punktbestrahlungen lässt sich schlussfolgern, dass die Simulation von Laserbestrahlungsprozessen unter der Verwendung des Kennwerts der temperaturkompensierten Zeit genutzt werden kann, um Absorptionssteigerungen von Werkstücken infolge einer Temperatureinwirkung vorherzusagen.

9 Zusammenfassung

Der Einfluss mehrfacher Wärmeeinwirkung auf die Änderung der Laserstrahlabsorption wurde in dieser Arbeit an Proben aus nichtrostendem Stahl untersucht. Dabei wurden ausschließlich Wärmeeinwirkungen an Umgebungsluft unterhalb der Schmelzgrenze des Werkstoffs betrachtet.

Die im Stand der Forschung erörterten Anwendungen mehrfacher Laserbestrahlung erstrecken sich von der Nutzung des Laserstrahls als Hauptenergiequelle wie beim Laserstrahlbiegen bis hin zur Möglichkeit der lokalen Temperaturerhöhung wie beim inkrementellen Umformen. Obwohl die Werkstücktemperaturerhöhung maßgeblich durch die Absorption der Laserstrahlung auf der Oberfläche beeinflusst wird und diese von der Oberflächenbeschaffenheit abhängig ist, wird eine Veränderung der Absorption während des Prozesses bislang unzureichend berücksichtigt.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Absorptionsänderungen von Proben aus dem nichtrostenden Stahl 1.4301, die durch eine Werkstoffenerwärmung hervorgerufen werden, vorhersagen zu können. Dies soll unabhängig von der Oberflächenbeschaffenheit, die durch die Rauheit und den Oxidationszustand beeinflusst wird, ermöglicht werden.

Bei Versuchen mit einer laserstrahlinduzierten Werkstoffenerwärmung konnten Absorptionsänderungen hervorgerufen werden. Die Annahme, dass die Oxidation und nicht eine Topografieänderung der Haupteinflussfaktor für die Änderung der Absorption ist, wird auch durch mikrostrukturelle Untersuchungen bekräftigt. Zudem zeigen Proben, die einer plastischen Verformung ausgesetzt wurden, eine Rauheitsänderung ohne eine signifikante Absorptionsänderung.

Die durch einen temperaturgeregelten Laserstrahlprozess unterschiedlichen Zeit-Temperatur-Verläufe können durch den verwendeten Kennwert der temperaturkompensierten Zeit untereinander verglichen werden. Durch die Darstellung der Absorptionsänderungen ist erkennbar, dass die Absorption nicht kontinuierlich mit zunehmender temperaturkompensierter Zeit ansteigt. Mit einer Analyse der Regressionsfunktion der Absorptionssteigerungen lässt sich eine Sättigungsschwelle von 82.2 % identifizieren. Dieser Wert steht im Einklang mit den aus der Literatur bekannten Absorptionswerten der bei dieser Stahlsorte auftretenden Oxiden.

Die Auswirkungen einer temperaturgeregelten Punktbestrahlung zeigen sich abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit der Probe, die durch mechanische und thermische Vorbehandlungen beeinflusst wurde. Neben der initialen Absorption ist auch die Absorptionszunahme abhängig von der Ausgangsoberfläche. Es wurde eine Vorhersage-

methode basierend auf der Definition einer Bezugsvorbehandlung, die die geringste initiale Absorption aller verglichenen Vorbehandlungen aufweist, entwickelt. Damit können beliebige Wärmeeinwirkungen unabhängig von der Oberflächenvorbehandlung als Wärmeeinwirkung auf die Bezugsvorbehandlung interpretiert werden. Die dafür genutzten Koeffizienten können mit dem hybriden Rauheitskennwert des quadratischen Neigungsmittelwerts Sdq korreliert werden.

Der Vorteil eines prozessabhängigen Absorptionsgrads konnte anhand einer numerischen Simulation verdeutlicht werden. Die Nutzung eines prozessabhängigen Absorptionsgrads zeigt im Vergleich mit einem konstanten Absorptionsgrad das Potential zur Steigerung der Vorhersagegenauigkeit. Zudem wird eine Skalierbarkeit der Simulation ermöglicht, da der Absorptionsgrad prozessabhängig angepasst wird und nicht ein höherer initialer Wert gewählt werden muss, um die Absorptionssteigerung im Prozess zu kompensieren.

Die nach der Vorhersagemethode berechneten Absorptionswerte können mit den im Experiment gemessenen und den in der Simulation ermittelten Absorptionswerten korreliert werden. Daher können für die entwickelte Vorhersagemethode die Temperaturverläufe sowohl gemessen als auch durch eine numerische Simulation ermittelt werden, wobei die Probenvorbehandlung oder die Oberflächenbeschaffenheit nicht berücksichtigt werden muss. Einzig die Ausgangsabsorption und ein charakteristischer Oberflächenkennwert müssen bestimmt werden, um den Verlauf der Absorptionsänderung infolge einer Temperatureinwirkung vorhersagen zu können.

Literaturverzeichnis

- [1] Geiger, M.; Vollertsen, F.: The Mechanisms of Laser Forming. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology 42, 1 (1993) 301-304
- [2] Arnet, H.; Vollertsen, F.: Extending Laser Bending for the Generation of Convex Shapes. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 209, 6 (1995) 433-442
- [3] Vollertsen, F.; Komel, I.; Kals, R.: The laser bending of steel foils for microparts by the buckling mechanism-a model. In: Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering 3, 1 (1995) 107
- [4] Ueda, T.; Sentoku, E.; Yamada, K.; Hosokawa, A.: Temperature Measurement in Laser Forming of Sheet Metal. In: CIRP Annals 54, 1 (2005) 179-182
- [5] Che Jamil, M. S.; Sheikh, M. A.; Li, L.: A study of the effect of laser beam geometries on laser bending of sheet metal by buckling mechanism. In: Optics & Laser Technology 43, 1 (2011) 183-193
- [6] Bartkowiak, K.; Dearden, G.; Edwardson, S. P.; Watkins, K. G.: Development of 2D and 3D laser forming strategies for thin section materials using scanning optics. In: Proceedings of the 23rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics 2004; P559
- [7] Hoseinpour Gollo, M.; Mahdavian, S. M.; Moslemi Naeini, H.: Statistical analysis of parameter effects on bending angle in laser forming process by pulsed Nd - YAG laser. In: Optics & Laser Technology 43, 3 (2011) 475-482
- [8] Shen, H.; Ran, M.; Hu, J.; Yao, Z.: An experimental investigation of underwater pulsed laser forming. In: Optics and Lasers in Engineering 62 (2014) 1-8
- [9] Hennige, T.; Holzer, S.; Vollertsen, F.; Geiger, M.: On the working accuracy of laser bending. In: Journal of Materials Processing Technology 71, 3 (1997) 422-432
- [10] Thomsen, A. N.; Kristiansen, M.; Kristiansen, E.; Endelt, B.: Online measurement of the surface during laser forming. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 107, 3-4 (2020) 1569-1579
- [11] Bao, J.; Yao, Y. L.: Analysis and Prediction of Edge Effects in Laser Bending. In: Journal of Manufacturing Science and Engineering 123, 1 (2001) 53
- [12] Thomsen, A. N.; Kristiansen, E.; Kristiansen, M.; Endelt, B.: Influence of cooling on edge effects in laser forming. In: Procedia CIRP 74 (2018) 394-397

- [13] Shen, H.; Hu, J.; Yao, Z.: Analysis and control of edge effects in laser bending. In: *Optics and Lasers in Engineering* 48, 3 (2010) 305-315
- [14] Shi, Y.; Zhang, C.; Sun, G.; Li, C.: Study on reducing edge effects by using assistant force in laser forming. In: *Journal of Materials Processing Technology* 227 (2016) 169-177
- [15] Birnbaum, A. J.; Cheng, P.; Yao, Y. L.: Effects of Clamping on the Laser Forming Process. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 129, 6 (2007) 1035-1044
- [16] Hu, J.; Xu, H.; Dang, D.: Modeling and reducing edge effects in laser bending. In: *Journal of Materials Processing Technology* 213, 11 (2013) 1989-1996
- [17] Maji, K.; Pratihari, D. K.; Nath, A. K.: Experimental investigations and statistical analysis of pulsed laser bending of AISI 304 stainless steel sheet. In: *Optics & Laser Technology* 49 (2013) 18-27
- [18] Thomsen, A. N.; Kristiansen, E.; Kristiansen, M.; Endelt, B.: Investigation of the Profile of Laser Bends with Variable Scan Distance. In: *Procedia Manufacturing* 36 (2019) 192-199
- [19] Shidid, D. P.; Gollo, M. H.; Brandt, M.; Mahdavian, M.: Study of effect of process parameters on titanium sheet metal bending using Nd: YAG laser. In: *Optics & Laser Technology* 47 (2013) 242-247
- [20] Shi, Y.; Yao, Z.; Shen, H.; Hu, J.: Research on the mechanisms of laser forming for the metal plate. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 46, 12-13 (2006) 1689-1697
- [21] Woizeschke, P.: Approach for bidirectional laser bending of sheet metal with one-sided accessibility. In: *CIRP Annals* 68, 1 (2019) 277-280
- [22] Edwardson, S. P.; Abed, E.; Carey, C.; Edwards, K. R.; Bartkowiak, K.; Dearden, G.; Watkins, K. G.: Key factors influencing the bend per pass in laser forming. ICALEO® 2007: 26th International Congress on Laser Materials Processing, Laser Microprocessing and Nanomanufacturing; October 29–November 1, 2007; Orlando, Florida, USA; Hrsg.: Y. Lu. In: *Congress proceedings / 2007 ICALEO, 26th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*; Laser Institute of America; Orlando, Fla. (2007) P506
- [23] Edwardson, S. P.; Abed, E.; Bartkowiak, K.; Dearden, G.; Watkins, K. G.: Geometrical influences on multi-pass laser forming. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 39, 2 (2006) 382-389
- [24] Sprenger, A.; Vollertsen, F.; Steen, W. M.; Watkins, K.; University of Erlangen-Nuremberg; Chair of Manufacturing Technology; International Institution for

- Production Engineering Research; Scientific Society for Production Technology: Influence of Strain Hardening on Laser Bending. In: Laser assisted net shape engineering; - Proceedings of the 26th International CIRP Seminar on Manufacturing Systems - LANE '94, Erlangen, October 12 - 14, 1994; Hrsg.: M. Geiger. Meisenbach; Bamberg (1994) 361-370
- [25] Li, W.; Yao, Y. L.: Effects of strain rate in laser forming. ICALEO 1999: Proceedings of the Laser Applications in the Medical Devices Industry Conference; In: International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics; Laser Institute of America (1999) F107-F116
- [26] Li, W.; Yao, Y. L.: Laser Forming with Constant Line Energy. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 17, 3 (2001) 196-203
- [27] Tetzl, H.; Grden, M.; Vollertsen, F.: Stress analysis based on strain measurement in sheet metal laser bending. In: Production Engineering 7, 6 (2013) 647-655
- [28] Wu, D.; Ma, G.; Niu, F.; Guo, D.: Temperature Gradient Mechanism on Laser Bending of Borosilicate Glass Sheet. In: Journal of Manufacturing Science and Engineering 132, 1 (2010)
- [29] Che Jamil, M. S.; Imam Fauzi, E. R.; Juinn, C. S.; Sheikh, M. A.: Laser bending of pre-stressed thin-walled nickel micro-tubes. In: Optics & Laser Technology 73 (2015) 105-117
- [30] Walczyk, D. F.; Vittal, S.: Bending of Titanium Sheet Using Laser Forming. In: Journal of Manufacturing Processes 2, 4 (2000) 258-269
- [31] Jiang, S. Q.; Liu, A. H.; Wang, X. T.; Wu, J. H.; Li, B. K.: Numerical Study on Bending Behavior of Copper Alloy Thin Plate by Single Pulse Laser. In: Advanced Materials Research 1003 (2014) 113-116
- [32] Exner, H.; Loschner, U.: Contactless laser bending of silicon microstructures. Microtechnologies for the New Millennium 2003; Monday 19 May 2003; Maspalomas, Gran Canaria, Canary Islands, Spain; Hrsg.: J.-C. Chiao, V. K. Varadan, C. Can. In: Smart Sensors, Actuators, and MEMS; SPIE (2003) 383
- [33] Wu, D.; Zhang, Q.; Ma, G.; Guo, Y.; Guo, D.: Laser bending of brittle materials. In: Optics and Lasers in Engineering 48, 4 (2010) 405-410
- [34] Yau, C. L.; Chan, K. C.; Lee, W. B.: Laser bending of leadframe materials. In: Journal of Materials Processing Technology 82, 1-3 (1998) 117-121
- [35] Lazarus, N.; Bedair, S. S.; Smith, G. L.: Origami Inductors: Rapid Folding of 3-D Coils on a Laser Cutter. In: IEEE Electron Device Letters 39, 7 (2018) 1046-1049

- [36] Engler, I.: Verfahrenskombination Laserstrahlschweißen und -richten am Beispiel einer Titan-Leichtbaustruktur. *Strahltechnik* 12; BIAS; Bremen (1999)
- [37] Reitemeyer, D.; Schultz, V.; Syassen, F.; Seefeld, T.; Vollertsen, F.: Laser Welding of Large Scale Stainless Steel Aircraft Structures. In: *Physics Procedia* 41 (2013) 106-111
- [38] Zaeh, M. F.; Hornfeck, T.: Development of a robust laser beam bending process for aluminum fuselage structures. In: *Production Engineering* 2, 2 (2008) 149-155
- [39] Schultz, V.; Thomy, C.; Vollertsen, F.; Schrauf, G.: Development of a Laser Welding and Straightening Process for Aircraft Structures for Hybrid Laminar Flow Control. In: *IIW Annual Assembly Seoul/Korea* (2014) paper no. IV-1180-14
- [40] Lazarus, N.; Smith, G. L.: Laser Folding in a Roll-to-Roll Manufacturing Process. In: *Lasers in Manufacturing and Materials Processing* 5, 3 (2018) 237-247
- [41] Kim, J.; Na, S. J.: Development of irradiation strategies for free curve laser forming. In: *Optics & Laser Technology* 35, 8 (2003) 605-611
- [42] Kim, J.; Na, S. J.: 3D laser-forming strategies for sheet metal by geometrical information. In: *Optics & Laser Technology* 41, 6 (2009) 843-852
- [43] Safari, M.; Farzin, M.: Experimental investigation of laser forming of a saddle shape with spiral irradiating scheme. In: *Optics & Laser Technology* 66 (2015) 146-150
- [44] Chakraborty, S. S.; Maji, K.; Racherla, V.; Nath, A. K.: Investigation on laser forming of stainless steel sheets under coupling mechanism. In: *Optics & Laser Technology* 71 (2015) 29-44
- [45] Gao, H.; Sheikholeslami, G.; Dearden, G.; Edwardson, S. P.: Reverse Analysis of Scan Strategies for Controlled 3D Laser Forming of Sheet Metal. In: *Procedia Engineering* 183 (2017) 369-374
- [46] Gisario, A.; Barletta, M.; Venettacci, S.; Veniali, F.: Progress in Tridimensional (3d) Laser Forming of Stainless Steel Sheets. In: *Lasers in Manufacturing and Materials Processing* 2, 3 (2015) 148-163
- [47] Imhan, K. I.; Baharudin, B.T.H.T.; Zakaria, A.; Ismail, M. I. S. B.; Alsabti, N. M. H.; Ahmad, A. K.: Investigation of material specifications changes during laser tube bending and its influence on the modification and optimization of analytical modeling. In: *Optics & Laser Technology* 95 (2017) 151-156
- [48] Folkersma, K.G.P.; Brouwer, D. M.; Römer, G.R.B.E.; Herder, J. L.: Robust precision alignment algorithm for micro tube laser forming. In: *Precision Engineering* 46 (2016) 301-308

- [49] Wang, X. Y.; Wang, J.; Xu, W. J.; Guo, D. M.: Scanning path planning for laser bending of straight tube into curve tube. In: *Optics & Laser Technology* 56 (2014) 43-51
- [50] Bucher, T.; Cardenas, S.; Verma, R.; Li, W.; Lawrence Yao, Y.: Laser Forming of Sandwich Panels With Metal Foam Cores. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 140, 11 (2018)
- [51] Gisario, A.; Barletta, M.; Conti, C.; Guarino, S.: Springback control in sheet metal bending by laser-assisted bending - Experimental analysis, empirical and neural network modelling. In: *Optics and Lasers in Engineering* 49, 12 (2011) 1372-1383
- [52] Gisario, A.; Barletta, M.; Venettacci, S.: Improvements in springback control by external force laser-assisted sheet bending of titanium and aluminum alloys. In: *Optics & Laser Technology* 86 (2016) 46-53
- [53] Gisario, A.; Mehrpouya, M.; Venettacci, S.; Barletta, M.: Laser-assisted bending of Titanium Grade-2 sheets // Laser-assisted bending of Titanium Grade-2 sheets: Experimental analysis and numerical simulation - Experimental analysis and numerical simulation. In: *Optics and Lasers in Engineering* 92 (2017) 110-119
- [54] Geiger, M.; Merklein, M.; Pitz, M.: Laser and forming technology—an idea and the way of implementation. In: *Special Volume dedicated to Professor Z.R. Wang on the occasion of his 70th Birthday*. 151, 1–3 (2004) 3-11
- [55] Klocke, F.; Brummer, C. M.: Laser-assisted Metal Spinning of Challenging Materials. In: *Procedia Engineering* 81 (2014) 2385-2390
- [56] Ueda, T.; Sentoku, E.; Wakimura, Y.; Hosokawa, A.: Flattening of sheet metal by laser forming. In: *Optics and Lasers in Engineering* 47, 11 (2009) 1097-1102
- [57] Duflou, J. R.; Callebaut, B.; Verbert, J.; Baerdemaeker, H. de: Laser Assisted Incremental Forming - Formability and Accuracy Improvement. In: *CIRP Annals* 56, 1 (2007) 273-276
- [58] Hino, R.; Kawabata, K.; Yoshida, F.: Incremental Forming with Local Heating by Laser Irradiation for Magnesium Alloy Sheet. In: *Procedia Engineering* 81 (2014) 2330-2335
- [59] Biermann, T.; Göttmann, A.; Zettler, J.; Bambach, M.; Weisheit, A.; Hirt, G.; Poprawe, R.: Hybrid Laser-Assisted Incremental Sheet Forming – Improving Formability of Ti- and Mg-Based Alloys. June 15th-18th; Munich; Hrsg.: A. Ostendorf, T. Graf, D. Petring, A. Otto. In: *Proceedings of the Fifth International WLT-Conference Lasers in Manufacturing, LIM 2009; AT-Fachverlag GmbH; Stuttgart (2009) 273 - 278*

- [60] Göttmann, A.; Diettrich, J.; Bergweiler, G.; Bambach, M.; Hirt, G.; Loosen, P.; Poprawe, R.: Laser-assisted asymmetric incremental sheet forming of titanium sheet metal parts. In: *Production Engineering* 5, 3 (2011) 263-271
- [61] Vollertsen, F.: An Analytic Model for Laser Bending. In: *Lasers in Engineering*, 2 (1994) 261-276
- [62] Yau, C. L.; Chan, K. C.; Lee, W. B.: A new analytical model for laser bending. In: *Laser assisted net shape engineering 2; - Proceedings of the 30th International CIRP Seminar on Manufacturing Systems - LANE '97, Erlangen, September 23 - 26, 1997; Hrsg.: M. Geiger. Meisenbach; Bamberg (1997)* 357-366
- [63] Lambiase, F.: An Analytical Model for Evaluation of Bending Angle in Laser Forming of Metal Sheets. In: *Journal of Materials Engineering and Performance* 21, 10 (2012) 2044-2052
- [64] Kyrsanidi, A.K.; Kermanidis, T.B.; Pantelakis, S.G.: An analytical model for the prediction of distortions caused by the laser forming process. In: *Journal of Materials Processing Technology* 104, 1-2 (2000) 94-102
- [65] Cheng, P. J.; Lin, S. C.: An analytical model to estimate angle formed by laser. In: *Journal of Materials Processing Technology* 108, 3 (2001) 314-319
- [66] Cheng, P.; Lawrence Yao, Y.; Liu, C.; Pratt, D.; Fan, Y.: Analysis and Prediction of Size Effect on Laser Forming of Sheet Metal. In: *Journal of Manufacturing Processes* 7, 1 (2005) 28-41
- [67] Shen, H.; Shi, Y.; Yao, Z.; Hu, J.: An analytical model for estimating deformation in laser forming. In: *Computational Materials Science* 37, 4 (2006) 593-598
- [68] Marya, M.; Edwards, G.R.: An analytical model for the optimization of the laser bending of titanium Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo. In: *Journal of Materials Processing Technology* 124, 3 (2002) 337-344
- [69] Ji, Z.; Wu, S.: FEM simulation of the temperature field during the laser forming of sheet metal. In: *Journal of Materials Processing Technology* 74, 1-3 (1998) 89-95
- [70] Hu, Z.; Labudovic, M.; Wang, H.; Kovacevic, R.: Computer simulation and experimental investigation of sheet metal bending using laser beam scanning. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 41, 4 (2001) 589-607
- [71] Shen, H.; Shi, Y.; Yao, Z.: Laser Forming of Plates Using Two Sequent Scans of Different Intervals. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 220, 4 (2006) 507-511

- [72] Shen, H.; Shi, Y.; Yao, Z.: Numerical simulation of the laser forming of plates using two simultaneous scans. In: *Computational Materials Science* 37, 3 (2006) 239-245
- [73] Griffiths, J.; Edwardson, S. P.; Dearden, G.; Watkins, K. G.: Finite Element modelling of laser forming at macro and micro scales. In: *Physics Procedia* 5 (2010) 371-380
- [74] Castillo, J. I.; Celentano, D. J.; Cruchaga, M. A.; García-Herrera, C. M.: Characterization of strain rate effects in sheet laser forming. In: *Comptes Rendus Mécanique* 346, 8 (2018) 794-805
- [75] Na, S. J.; Kim, J. T.: 3D laser forming strategies for sheet metal by geometrical information. In: *International Journal of Material Forming* 1, S1 (2008) 1367-1370
- [76] Martin Grden: Simulation thermischen Biegens mittels Gebietszerlegung. *Strahltechnik* 52; BIAS Verlag; Bremen (2013)
- [77] Pitz, I.; Otto, A.; Schmidt, M.: Simulation of the laser beam forming process with Moving Meshes for large aluminium plates. In: *Physics Procedia* 5 (2010) 363-369
- [78] Pitz, I.; Otto, A.; Schmidt, M.: Meshing strategies for the efficient computation of laser beam forming processes on large aluminium plates. In: *International Journal of Material Forming* 3, S1 (2010) 895-898
- [79] Hu, J.; Dang, D.; Shen, H.; Zhang, Z.: A finite element model using multi-layered shell element in laser forming. In: *Optics & Laser Technology* 44, 4 (2012) 1148-1155
- [80] Lvovsky, A. I.: Fresnel Equations. In: *Encyclopedia of Optical and Photonic Engineering, Second Edition*; Hrsg.: C. Hoffman, R. Driggers. CRC Press [Imprint]; Taylor & Francis Group; Taylor & Francis Group [distributor]; Abingdon, Florence (2015)
- [81] Zhou, P.; Huang, L.; Xu, J.; Ma, P.; Su, R.; Wu, J.; Liu, Z.: High power linearly polarized fiber laser: Generation, manipulation and application. In: *Science China Technological Sciences* 60, 12 (2017) 1784-1800
- [82] Dausinger, F.: *Strahlwerkzeug Laser: Energiekopplung und Prozesseffektivität (german)*. Laser in der Materialbearbeitung; Teubner; Stuttgart (1995)
- [83] Dausinger, F.; Shen, J.: Energy Coupling Efficiency in Laser Surface Treatment. In: *ISIJ International* 33, 9 (1993) 925-933

- [84] Dewi, H. S.; Volpp, J.; Kaplan, A. F. H.: Laser beam absorption depending on the angle of incidence on ground surfaces. In: Proceeding of WLT Lasers in Manufacturing Conference 2019, Munich, Germany;
- [85] Beyer, E.: Plasmaabsorption. In: Schweißen mit Laser; - Grundlagen; Hrsg.: E. Beyer. Springer; Berlin (1995) 49-77
- [86] Möller, F.: Wechselwirkung zwischen Lichtbogen und Laserstrahl beim Fügen von Aluminium. , Dissertation (2016)
- [87] Baton, S. D.; Labaune, C.; Lacaze, J. L.: Influence of absorption and refraction on laser interaction studies in preformed plasmas. In: Optics Communications 74, 3-4 (1989) 195-201
- [88] Rozman, R.; Grabec, I.; Govekar, E.: Influence of absorption mechanisms on laser-induced plasma plume. In: Applied Surface Science 254, 11 (2008) 3295-3305
- [89] Gipperich, M.; Riepe, J.; Arntz, K.; Bergs, T.: Pulsed Laser Influence on Temperature Distribution during Dual Beam Laser Metal Deposition. In: Metals 10, 6 (2020) 766
- [90] Simonds, B. J.; Sowards, J. W.; Hadler, J.; Pfeif, E.; Wilthan, B.; Tanner, J.; Harris, C.; Williams, P. A.; Lehman, J.: Dynamic and absolute measurements of laser coupling efficiency during laser spot welds. In: Procedia CIRP 74 (2018) 632-635
- [91] Schneider, M.; Berthe, L.; Fabbro, R.; Muller, M.: Measurement of laser absorptivity for operating parameters characteristic of laser drilling regime. In: Journal of Physics D: Applied Physics 41, 15 (2008) 155502
- [92] Bergström, D.: The Absorption of Laser Light by Rough Metal Surfaces. , Doctoral thesis (February 2008)
- [93] Trapp, J.; Rubenchik, A. M.; Guss, G.; Matthews, M. J.: In situ absorptivity measurements of metallic powders during laser powder-bed fusion additive manufacturing. In: Applied Materials Today 9 (2017) 341-349
- [94] Ricciardi, G.; Cantello, M.: Laser Material Interaction: Absorption Coefficient in Welding and Surface Treatment. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology 43, 1 (1994) 171-175
- [95] Seibold, G.: Absorption technischer Oberflächen in der Lasermaterialbearbeitung. Laser in der Materialbearbeitung; Herbert Utz Verlag; Munich (2006)
- [96] Abedi, H. R.; Hoseinpour Gollo, M.: An experimental study of the effects of surface roughness and coating of Cr₂O₃ layer on the laser-forming process. In: Optics & Laser Technology 109 (2019) 336-347

- [97] Bielik, R.; Bammer, F.; Otto, A.; Stiglbrunner, C. F.; Colasse, C.; Murzin, S. P.: Simulation of forming processes with local heating of dual phase steels with use of laser beam shaping systems. In: *Computer Optics* 40, 5 (2016) 659-667
- [98] Hipp, D.; Mahrle, A.; Beyer, E.: Dynamic method for determination of coupling efficiencies in laser material processing. In: *Lasers in Manufacturing Conference 2017*;
- [99] Hipp, D.; Mahrle, A.; Beyer, E.: Energy Coupling of Laser Radiation on AISI 304 Stainless Steel - Effect of High Temperatures and Surface Oxidation. In: *Materials (Basel, Switzerland)* 12, 17 (2019)
- [100] Kwon, H.; Baek, W.-K.; Kim, M.-S.; Shin, W.-S.; Yoh, J. J.: Temperature-dependent absorptance of painted aluminum, stainless steel 304, and titanium for 1.07 μm and 10.6 μm laser beams. In: *Optics and Lasers in Engineering* 50, 2 (2012) 114-121
- [101] Volpp, J.; Dewi, H. S.; Fischer, A.; Niendorf, T.: Influence of complex geometries on the properties of laser-hardened surfaces. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 107, 9-10 (2020) 4255-4260
- [102] Agababov, S. G.: Effect of the roughness of the surface of a solid body on its radiation properties and methods for their experimental determination. In: *High Temperature: cover to cover translation of Teplofizika vysokikh temperatur* 6, 1 (1968) 76-85
- [103] Wen, C.-D.; Mudawar, I.: Modeling the effects of surface roughness on the emissivity of aluminum alloys. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49, 23-24 (2006) 4279-4289
- [104] Kaplan, A. F.H.: Local absorptivity modulation of a 1 μm -laser beam through surface waviness. In: *Applied Surface Science* 258, 24 (2012) 9732-9736
- [105] Pantsar, H.; Kujanpää, V.: Diode laser beam absorption in laser transformation hardening of low alloy steel. In: *Journal of Laser Applications* 16, 3 (2004) 147-153
- [106] Hipp, D.; Mahrle, A.; Beyer, E.: Beyond Fresnel: absorption of fibre laser radiation on rough stainless steel surfaces. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 52, 35 (2019) 355302
- [107] McAdam, D. J.; Geil, G. W.: Rate of oxidation of steels as determined from interference colors of oxide films. In: *Journal of Research of the National Bureau of Standards* 23 (1939) 63-124
- [108] Higginson, R. L.; Jackson, C. P.; Murrell, E. L.; Exworthy, P. A. Z.; Mortimer, R. J.; Worrall, D. R.; Wilcox, G. D.: Effect of thermally grown oxides on colour de-

- velopment of stainless steel. In: *Materials at High Temperatures* 32, 1-2 (2015) 113-117
- [109] Junqueira, R. M. R.; Loureiro, C. R. d. O.; Andrade, M. S.; Buono, V. T. L.: Characterization of interference thin films grown on stainless steel surface by alternate pulse current in a sulphochromic solution. In: *Materials Research* 11, 4 (2008) 421-426
- [110] Antończak, A. J.; Kocoń, D.; Nowak, M.; Koziół, P.; Abramski, K. M.: Laser-induced colour marking—Sensitivity scaling for a stainless steel. In: *Applied Surface Science* 264 (2013) 229-236
- [111] Lawrence, S. K.; Adams, D. P.; Bahr, D. F.; Moody, N. R.: Mechanical and electromechanical behavior of oxide coatings grown on stainless steel 304L by nanosecond pulsed laser irradiation. In: *Surface and Coatings Technology* 235 (2013) 860-866
- [112] Yoshida, M.; Asano, T.: A New Method to Measure the Oxide Layer Thickness on Steels Using Electromagnetic Acoustic Resonance. In: *Journal of Nondestructive Evaluation* 22, 1 (2003) 11-21
- [113] Vesel, A.; Mozetič, M.; Zalar, A.: Oxidation of AISI 304L stainless steel surface with atomic oxygen. In: *Applied Surface Science* 200, 1-4 (2002) 94-103
- [114] Vesel, A.; Mozetic, M.; Drenik, A.; Hauptman, N.; Balat-Pichelin, M.: High temperature oxidation of stainless steel AISI316L in air plasma. In: *Applied Surface Science* 255, 5 (2008) 1759-1765
- [115] Gulbransen, E. A.; Andrew, K. F.: Oxidation Studies on 304 Stainless Steel. In: *Journal of The Electrochemical Society* 109, 7 (1962) 560
- [116] Smith, A. F.: The oxidation of an 18/8 type stainless steel in CO₂. In: *Materials and Corrosion/Werkstoffe und Korrosion* 30, 2 (1979) 100-104
- [117] Goutier, F.; Valette, S.; Vardelle, A.; Lefort, P.: Oxidation of stainless steel 304L in carbon dioxide. In: *Corrosion Science* 52, 7 (2010) 2403-2412
- [118] Allen, G. C.; Dyke, J. M.; Harris, S. J.; Morris, A.: A surface study of the oxidation of type 304L stainless steel at 600 K in air. In: *Oxidation of Metals* 29, 5-6 (1988) 391-408
- [119] Ghosh, S.; Kumar, M. K.; Kain, V.: High temperature oxidation behavior of AISI 304L stainless steel - Effect of surface working operations. In: *Applied Surface Science* 264 (2013) 312-319
- [120] Fujikawa, H.; Iijima, Y.: Effect of Grain Size on the High Temperature Oxidation Behaviour of Austenitic Stainless Steels. In: *Defect and Diffusion Forum* 333 (2013) 149-155

- [121] Guillamet, R.; Lopitiaux, J.; Hannyoyer, B.; Lenglet, M.: Oxidation of stainless steels (AISI 304 and 316) at high temperature. Influence on the metallic substratum. In: Journal de Physique IV Colloque 03, C9 (1992) C9-349-C9-356
- [122] Cui, C. Y.; Cui, X. G.; Ren, X. D.; Qi, M. J.; Hu, J. D.; Wang, Y. M.: Surface oxidation phenomenon and mechanism of AISI 304 stainless steel induced by Nd:YAG pulsed laser. In: Applied Surface Science 305 (2014) 817-824
- [123] Cui, C. Y.; Cui, X. G.; Zhang, Y. K.; Zhao, Q.; Lu, J. Z.; Hu, J. D.; Wang, Y. M.: Microstructure and corrosion behavior of the AISI 304 stainless steel after Nd:YAG pulsed laser surface melting. In: Surface and Coatings Technology 206, 6 (2011) 1146-1154
- [124] Sabioni, A. C. S.; Ramos, R. P. B.; Ji, V.; Jomard, F.: Oxygen Diffusion Study in Oxidation Films of the AISI 304 Austenitic Stainless Steel. In: Defect and Diffusion Forum 323-325 (2012) 345-351
- [125] Tsai, S. C.; Huntz, A. M.; Dolin, C.: Growth mechanism of Cr₂O₃ scales: oxygen and chromium diffusion, oxidation kinetics and effect of yttrium. In: 13th International Conference on the Strength of Materials 212, 1 (1996) 6-13
- [126] Huntz, A. M.; Reckmann, A.; Haut, C.; Sévérac, C.; Herbst, M.; Resende, F.C.T.; Sabioni, A.C.S.: Oxidation of AISI 304 and AISI 439 stainless steels. In: Materials Science and Engineering: A 447, 1-2 (2007) 266-276
- [127] Carvalho, C. E. R. de; Costa, G. M. d.; Cota, A. B.; Rossi, E. H.: High temperature oxidation behavior of AISI 304 and AISI 430 stainless steels. In: Materials Research 9, 4 (2006) 393-397
- [128] Sabioni, A. C. S.; Ramos, R. P. B.; Ji, V.; Jomard, F.; Macedo, W. A. d. A.; Gastelois, P. L.; Trindade, V. B.: About the Role of Chromium and Oxygen Ion Diffusion on the Growth Mechanism of Oxidation Films of the AISI 304 Austenitic Stainless Steel. In: Oxidation of Metals 78, 3-4 (2012) 211-220
- [129] Sabioni, A. C. S.; Malheiros, E. A.; Ji, V.; Jomard, F.: Determination of Oxygen Diffusion Coefficient in Oxidation Films of the AISI 439 Ferritic Stainless Steel. In: Defect and Diffusion Forum 323-325 (2012) 339-344
- [130] Duley, W. W.; Semple, D. J.; Morency, J.-P.; Gravel, M.: Coupling coefficient for cw CO₂ laser radiation on stainless steel. In: Optics & Laser Technology 11, 6 (1979) 313-316
- [131] Hales, R.: The high temperature oxidation behaviour of austenitic stainless steels. In: Materials and Corrosion/Werkstoffe und Korrosion 29, 6 (1978) 393-399

- [132] Saito, M.; Furuya, H.; Koga, K.; Sugisaki, M.: Effect of Grain Size of Stainless Steel on Oxidation Rate under Oxygen Pressure Controlled by Mo/MoO₂ Oxygen Buffer. In: Journal of Nuclear Science and Technology 22, 2 (1985) 153-154
- [133] Sainte-Catherine, C.; Jeandin, M.; Kechemair, D.; Ricaud, J.-P.; Sabatier, L.: Study of Dynamic Absorptivity at 10.6 μm (CO₂) and 1.06 μm (Nd-YAG) Wavelengths as a Function of Temperature. In: Journal de Physique IV Colloque 01, C7 (1991) C7-151-C7-157
- [134] Karlsson, B.; Ribbing, C. G.: Optical constants and spectral selectivity of stainless steel and its oxides. In: Journal of Applied Physics 53, 9 (1982) 6340-6346
- [135] Hones, P.; Diserens, M.; Lévy, F.: Characterization of sputter-deposited chromium oxide thin films. In: Surface and Coatings Technology 120-121 (1999) 277-283
- [136] Al-Kuhaili, M. F.; Durrani, S.M.A.: Optical properties of chromium oxide thin films deposited by electron-beam evaporation. In: Optical Materials 29, 6 (2007) 709-713
- [137] Querry, M. R.: Optical constants - Contractor Report CRDC-CD-85034. U.S. Army; Aberdeen Proving Ground, Maryland (1985)
- [138] Vollertsen, F.: Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls (german). Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungstechnologie, LFT / Universität Erlangen, Nürnberg 13; Hanser; München (1990)
- [139] Bakker, H.; Bonzel, H. P.; Bruff, C. M.; Dayanada, M. A.; Gust, W.; Horváth, J.; Kaur, I.; Kidson, G. V.; Le Claire, A. D.; Mehrer, H.; Murch, G. E.; Neumann, G.; Stolica, N.; Stolwijk, N. A.: Diffusion in Solid Metals and Alloys. In: Landolt-Börnstein; - Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology - New Series; Hrsg.: H. Mehrer. Springer; Berlin, Heidelberg (1990)
- [140] N.N.: Product Raw Data - Nd:YAG Mirror NB1-K14, NB07-K14. Thorlabs, Inc.; URL: https://www.thorlabs.com/images/TabImages/NB1-K14_NB07-K14_Raw_Data.xlsx; Abrufdatum 07.04.2021

Veröffentlichungsliste

Publikationsliste Stand: 18.09.2022

In die Arbeit eingeflossene Beiträge in Zeitschriften mit peer review

Kügler, H

Effects of Short-Term Laser Beam Heating on the Absorptivity of Steel Sheets

Journal of Manufacturing and Materials Processing 3, 41 (2019)

DOI: 10.3390/jmmp3020041

Kügler, H; Vollertsen, F

Determining Absorption Variations of Multiple Laser Beam Treatments of Stainless Steel Sheets

Journal of Manufacturing and Materials Processing 2, 84 (2018)

DOI: 10.3390/jmmp2040084

Weitere Beiträge in Zeitschriften mit peer review

Mattulat, T; Kügler, H; Vollertsen, F

Investigations on the occurrence of different wetting regimes in laser brazing of zinc-coated steel sheets

Welding in the World (2020)

DOI: 10.1007/s40194-019-00843-9

ebenso in:

IIW Annual Assembly Com. XVII, Bratislava/Slovakia (2019)

Doc. XVII-A-0181-19

Gao, X. S; Wu, C. S; Goecke, S; Kügler, H

Effects of process parameters on weld bead defects in oscillating laser-GMA hybrid welding of lap joints

International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2017)

DOI: 10.1007/s00170-017-0637-y

Windmann, M; Röttger, A; Kügler, H; Theisen, W

Microstructure and mechanical properties of the heat-affected zone in laser-welded/brazed steel 22MnB5-AA6016 aluminum/AZ31 magnesium alloy

Journal of Materials Processing Technology 247 (2017) 11-18 (online)

DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.04.008

Gao, X. S; Wu, C. S; Goecke, S; Kügler, H

Numerical simulation of temperature field, fluid flow and weld bead formation in oscillating single mode laser-GMA hybrid welding

Journal of Materials Processing Technology 242 (2017) 147-159 online

DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.11.028

Kügler, H; Möller, F; Goecke, S; Vollertsen, F

Fatigue strength of hybrid welded 22MnB5 overlap joints

Material testing 58, 6 (2016) 569-574

DOI: 10.3139/120.110880

ebenso in:

Proceedings of the IIW Annual Assembly 2015 Com. XII, Helsinki, Finland (2015)

IIW Doc. XII-2247-15 (online)"

Windmann, M; Röttger, A; Kügler, H; Theisen, W

Laser Beam Welding of Magnesium to Coated High-Strength Steel 22MnB5

International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2016)

DOI: 10.1007/s00170--016-8682-5

Windmann, M; Röttger, A; Kügler, H; Theisen, W

Removal of oxides and brittle coating constituents at the surface of coated hot-forming 22MnB5 steel for a laser welding process with aluminum alloys

Surface and Coatings Technology 285 (2016) 153-160

DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.11.037

Windmann, M; Röttger, A; Kügler, H; Theisen, W; Vollertsen, F

Laser beam welding of aluminium to Al-base coated high-strength steel 22MnB5

Journal of Materials Processing Technology 217 (2014) 88-95 (online)

DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.10.026

Patente**Kügler, H; Woizeschke, P; Seefeld, T**

Verfahren und eine Vorrichtung zum Herstellen einer Fügeverbindung

Offenlegungsschrift DE 10 2015 115 183 A1 (2017)

Bücher**Kügler, H; Baum, S; Möller, F; Goecke, S; Vollertsen, F**

Laser-MSG Hybridschweißen von Stahlfeinblechen

FOSTA Bericht P 919, Verlag und Vertriebsgesellschaft mbh Düsseldorf (2015)

Beiträge in Zeitschriften**Kügler, H; Vollertsen, F**

Consideration of Absorption Coefficient Changes in Numerical Simulations of Laser Forming

Advanced Technologies and Materials 44, 1 (2019)

DOI: 10.24867/ATM-2019-1-001

Mattulat, T; Kügler, H; Vollertsen, F

Kennzahl zur Bewertung der Nahtkantenqualität beim Laserstrahllöten

Schweißen und Schneiden 71, 11 (2019) 746-748

Kügler, H; Vollertsen, F

Messbare Laserstrahleffizienz

Laser 1 (2018) 32-33

Verhoeven, R; Kügler, H; Woizeschke, P; Seefeld, T

Schweißen mit Autopilot: Schweißbahn mittels Sensor korrigieren

I2B Express 02 (2016) 15

Woizeschke, P; Kügler, H; Vollertsen, F

Bewerten und Vergleichen der Spaltüberbrückbarkeit unterschiedlicher thermischer Fügeverfahren - Der Benchmark-Spalt

Der Praktiker 8 (2016) 356-358

Kügler, H; Vollertsen, F

Laserstrahlfügen von Mischverbindungen aus 22MnB5 und Magnesium

lightweight design 1 (2016) 10

Kügler, H; Möller, F; Goecke, S; Vollertsen, F

Thermisches Fügen höchstfester Stähle

Schweißen und Schneiden 67, 12 (2015) 744

Möller, F; Kügler, H

Aramidschneiden mittels Laserstrahl

Schweißen und Schneiden 67, 4 (2015) 198

Möller, F; Kügler, H; Reitemeyer, D; Vollertsen, F

Laserstrahlfügen von Mangan-Bor-Stählen für moderne Leichtbaukonzepte

Schweißen und Schneiden 65/9 (2013) 628-630

Beiträge auf Konferenzen mit peer review**Mattulat, T; Kügler, H; Vollertsen, F**

Influence of filler wire oscillation on the seam texture in laser beam brazing

Proceedings of the 9th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP-Congress 2019), eds.: J. P. Wulfsberg, W. Hintze, B.-A. Behrens.

Production at the leading edge of technology (2019) 359-368

DOI: 10.1007/978-3-662-60417-5_36

Kügler, H; Mittelstädt, C; Vollertsen, F

Influence of joint configuration on the strength of laser welded presshardened steel

9th International Conference on Photonic Technologies (LANE 2016)

Physics Procedia 83 (2016) 373-382

DOI: 10.1016/j.phpro.2016.08.039

Möller, F; Kügler, H; Kötschau, S; Geier, A; Goecke, S

Gap bridging ability in laser GMA hybrid welding of thin 22MnB5 sheets

Proceedings Of the 8th International Conference on Photonic Technologies (LANE 2014), eds.: M. Schmidt, F. Vollertsen, M. Merklein.

Physics Procedia 56 (2014) 620-629

DOI: 10.1016/j.phpro.2014.08.052

Kügler, H; Vollertsen, F

Inductive preheating on laser beam welding of multimaterial joints of 22MnB5 and AA6016

Lasers in Manufacturing (LIM 2013), eds.: C. Emmelmann, M.F. Zaeh, T. Graf, M. Schmidt.

Physics Procedia 41 (2013) 41-48

DOI: 10.1016/j.phpro.2013.03.050

Beiträge auf Konferenzen**Kügler, H; Vollertsen, F**

Influences of surface pretreatments on absorptivity changes induced by laser beam processing

Proceedings of 8th International Congress on Laser Advanced Materials Processing (LAMP 2019) Paper #19-040 (Tu5-H1, A120213)

Kügler, H; Vollertsen, F

Arc stabilization by laser induced metal vapor

Proceedings of 8th International Congress on Laser Advanced Materials Processing (LAMP 2019)

Paper #19-078 (P-HPL59, A120214)

Kügler, H; Vollertsen, F

Advantages of an adaptive absorption coefficient for simulations of iterative laser beam processes

37th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2018) Orlando, FL, USA (2018)

Paper #1703

Kügler, H; Vollertsen, F

Stabilisieren des Lichtbogens durch Metaldampf

GST - Große Schweißtechnische Tagung 2017. DVS Berichte 337 (2017) 184-189

Goecke, S; Kügler, H; Baum, S; Vollertsen, F

Gap Bridging in Laser-GMA-Hybrid Welding of Boron Manganese UHSS

Proceedings of the The International Symposium on Visualization in Joining & Welding Science through Advanced Measurements and Simulation (Visual-JW2016), October 17-18, 2016, Hotel Hnyu Expo Park, Osaka, Japan

Kügler, H; Möller, F; Kötschau, S; Goecke, S; Vollertsen, F

Laser-MSG-Hybridschweißen von pressgehärteten Feinblechen mit reduziertem Wärmeeintrag

GST - Große Schweißtechnische Tagung 2015, DVS Berichte 315 (2015) 55-59

Möller, F; Kügler, H; Goecke, S

Laser-GMA-Hybrid Welding of high strength multi-material joints

Lasers in Manufacturing (LIM15) eds.: T. Graf, C. Emmelmann, L. Overmeyer, F. Vollertsen (2015)

Paper #322

Kügler, H; Geier, A; Mittelstädt, C; Möller, F; Seefeld, T

Gap tolerant joining of 22MnB5 steel by laser hybrid welding with beam oscillation and laser brazing with two laser beams

Proceedings of 33rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO 2014). LIA Orlando/USA (2014) paper no. 1201

DOI: 10.2351/1.5063114

Kügler, H; Möller, F; Kötschau, S; Geier, A; Goecke, S; Vollertsen, F

Bridgeability of increasing gap in laser GMA hybrid welding of 22MnB5

IIW Annual Assembly 2014 Com. XII, Seoul/Korea (2014)

Paper XII-2169-14

Vorträge**Kügler, H; Vollertsen, F**

Separation of the arc-stabilizing effects of surface heating and metal vapor injection by laser radiation

IIW Annual Assembly 2019, Bratislava, Slovakia, Doc. XII-2345-19 (10.07.2019)

Kügler, H

Laseranwendungen in der Fertigung

“Day of Photonics” bei ArcelorMittal Tailored Blanks Bremen (21.10.2016)

Kügler, H

Gap tolerant laser beam welding of ultra high strength steel and aluminium

Automotive Circle-Fachkonferenz "Fügen im Karosseriebau", Bad Nauheim (20.04.16)

Kügler, H; Vollertsen, F

Multimaterial joining of 22MnB5 and aluminum with support of inductive preheating

International Congress on Light Materials (LightMAT 2013) Bremen (04.09.2013)

Reihe Strahltechnik im BIAS Verlag

Bisher erschienen:

Herausgegeben von Ralf Bergmann

Thomas Seefeld, Tim Radel, Thorsten Mattulat (Eds.)

LAF 2022: Proceedings of the 12th Laser Applications Forum

Strahltechnik Bd. 76, Bremen, 2022 ISBN 978-3-933762-70-2

Herausgegeben von Frank Vollertsen, Ralf Bergmann

Sandro Eckert

Laser-Induced Thermochemical Polishing of Metals

Strahltechnik Band 75, BIAS Verlag, 2022, ISBN 978-3-933762-69-6

Tobias Valentino

Nutzung laserinduzierter Stoßwellen zur Hochdurchsatz Werkstoffprüfung

Strahltechnik Bd. 74, Bremen, 2021, ISBN 978-3-933762-68-9

Hannes Freiß

Hartpartikelverstärkte Oberfläche für das Trockentiefziehen eines hochlegierten Stahls

Strahltechnik Bd. 72, Bremen, 2020, ISBN 978-3-933762-66-5

Markus Prieske

Eignung von CVD-Diamantschichten für die Trockenumformung von Aluminium

Strahltechnik Bd. 71, Bremen, 2020, ISBN 978-3-933762-65-8

Hamza Messaoudi

Thermal conditions for laser chemical micro processing of metals

Strahltechnik Band 70, Bremen 2020, ISBN 978-3-933762-64-1

Tim Radel

Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen mit Schwingungsüberlagerung

Strahltechnik Band 69, Bremen 2020, ISBN 978-3-933762-63-4

Silke Huferath-von Lüpke

Produktionsbegleitende Messeinrichtung basierend auf digitaler Holografie

Strahltechnik Band 68, Bremen 2019, ISBN 978-3-933762-62-7

Salar Mehrafsun

Dynamisches Prozessverhalten bei der laserinduzierten thermochemischen Mikrostrukturierung von Metallen

Strahltechnik Band 67, Bremen 2018, ISBN 978-3-933762-61-0

Vijay V. Parsi Sreenivas

Material modifications due to nonlinear effects created by multiphoton absorption in single crystalline silicon

Strahltechnik Band 66, Bremen 2017, ISBN 978-3-933762-60-3

Peer Woizeschke

Eigenschaften laserstrahlgefügter Mischverbindungen aus Aluminium und Titan in Abhängigkeit der Kantengeometrie und Halbzeugstruktur

Strahltechnik Band 65, Bremen 2017, ISBN 978-3-933762-59-7

Henry Köhler

Schwingfestigkeit laserauftraggeschweißter legierter Stähle

Strahltechnik Band 64, Bremen 2017, ISBN 978-3-933762-58-0

Jörg Volpp

Dynamik und Stabilität der Dampfkapillare beim Laserstrahl-tiefschweißen

Strahltechnik Band 63, Bremen 2017, ISBN 978-3-933762-57-3

Colin Dankwart

High resolution of wave fields from measurements with unknown sensor positions and unknown phase shifts of the object wave

Strahltechnik Band 61, Bremen 2017, ISBN 978-3-933762-55-9

Edwin N. Kamau

Dynamic wave field synthesis: enabling the generation of field distributions with a large space-bandwidth product

Strahltechnik Band 60, Bremen 2016, ISBN 978-3-933762-54-2

Felix Möller

Wechselwirkung zwischen Lichtbogen und Laserstrahl beim Fügen von Aluminium

Strahltechnik Band 59, Bremen 2016, ISBN 978-3-933762-53-3

Simon Kibben

UV-laserbasierte Oberflächenfluorierung von Polymeren

Strahltechnik Band 58, Bremen 2016, ISBN 978-3-933762-52-8

Heiko Brüning

Prozesscharakteristiken des thermischen Stoffanhäufens in der Mikrofertigung

Strahltechnik Band 57, Bremen 2017, ISBN 978-3-933762-51-1

Michael Schwander

Lokale Diamantsynthese durch einen laserbasierten atmosphärischen CVD-PVD-Prozess

Strahltechnik Band 56, Bremen 2016, ISBN 978-3-933762-50-4

Marius Gatzen

Durchmischung beim Laserstrahl-tiefschweißen unter dem Einfluss niederfrequenter Magnetfelder

Strahltechnik Band 55, Bremen 2015, ISBN 978-3-933762-49-8

Frank Vollertsen, Hendrik Tetzl (Hrsg.)

Thermal Forming and Welding Distortion, Proceedings of the IWOTE'14

Strahltechnik Band 54, Bremen 2014, ISBN 978-3-933762-48-1

Zhuo Tang

Heißbrissvermeidung beim Schweißen von Aluminiumlegierungen mit einem Scheibenlaser

Strahltechnik Band 53, Bremen 2014, ISBN 978-3-933762-47-4

Martin Grden

Simulation thermischen Biegens mittels Gebietszerlegung

Strahltechnik Band 52, Bremen 2014, ISBN 978-3-933762-46-7

Jens Sakkiettibutra

Modellierung thermisch bedingter Formänderungen und Eigenspannungen von Stählen zum Aufbau von geregelten Prozessen

Strahltechnik Band 51, Bremen 2013, ISBN 978-3-933762-45-0

Frank Buschenhenke

Prozesskettenübergreifende Verzugsbeherrschung beim Laserstrahlschweißen am Beispiel einer Welle-Nabe-Verbindung

Strahltechnik Band 50, Bremen 2013, ISBN 978-3-933762-44-3

Daniel Reitemeyer

Stabilisierung der Fokuslage beim Schweißen mit Faser- und Scheibenlasern

Strahltechnik Band 49, Bremen 2013, ISBN 978-3-933762-43-6

Steffen Neumann

Einflussanalyse beim single mode Faserlaserschweißen zur Vermeidung des Hum-ping-Phänomens

Strahltechnik Band 48, Bremen 2012, ISBN 978-3-933762-42-9

Mostafa Agour

Determination of the complex amplitude of monochromatic light from a set of in-tensity observations

Strahltechnik Band 47, Bremen 2011, ISBN 978-3-933762-41-2

Andreas Stephen

Elektrochemisches Laser-Jet-Verfahren zur Mikrostrukturierung von Metallen

Strahltechnik Band 46, Bremen 2011, ISBN 978-3-933762-40-5

Michael Koerdt

Herstellung von integriert-optischen Sensorstrukturen in Polymersubstraten basierend auf Brechzahländerungen durch ultraviolette Laserstrahlung

Strahltechnik Band 45, Bremen 2011, ISBN 978-3-933762-39-9

Hanna Wielage

Hochgeschwindigkeitsumformen durch laserinduzierte Schockwellen

Strahltechnik Band 44, Bremen 2011, ISBN 978-3-933762-38-2

Claus Thomy

Dynamisches Prozessverhalten beim Laserstrahl-MSG-Hybridschweißen

Strahltechnik Band 43, Bremen 2011, ISBN 978-3-933762-37-5

Thomas Seefeld

Laser-Randschichtschmelzen mit erhöhter Prozessgeschwindigkeit am Beispiel von Aluminium-Zylinderlaufbahnen

Strahltechnik Band 42, Bremen 2011, ISBN 978-3-933762-36-8

Frank Vollertsen (Hrsg.)

Thermal Forming and Welding Distortion

Strahltechnik Band 41, Bremen 2011, ISBN 978-3-933762-35-1

Frank Vollertsen, Daniel Reitemeyer (Hrsg.)

Laserstrahlfügen: Prozesse, Systeme, Anwendungen, Trends

Strahltechnik Band 40, Bremen 2010, ISBN 978-3-933762-34-4

Claas Falldorf

Bestimmung der komplexwertigen Amplitude von Wellenfeldern auf Basis des Prinzips der Selbstreferenz

Strahltechnik Band 39, Bremen 2010, ISBN 978-3-933762-33-7

Marc Baumeister

Dynamische Laser-Mikroperforation mit single-mode Faserlaser

Strahltechnik Band 38, Bremen 2009, ISBN 978-3-933762-31-3

Zhenyu Hu

Analyse des tribologischen Größeneffekts beim Blechumformen

Strahltechnik Band 37, Bremen 2009, ISBN 978-3-933762-30-6

Frank Vollertsen, Thomas Seefeld (Eds.)

Laserbearbeitung: Prozesse, Systeme, Anwendungen, Trends

Strahltechnik Band 36, Bremen 2008, ISBN 978-3-933762-28-3

Torsten Baumbach

Untersuchungen zur vergleichenden, digitalen Holografie mit aktiver Wellenfrontmodifikation

Strahltechnik Band 35, Bremen 2008, ISBN 978-3-933762-27-6

Knut Partes

Hochgeschwindigkeitsbeschichten mit dem Laserstrahl

Strahltechnik Band 34, Bremen 2008, ISBN 978-3-933762-26-9

Hendrik Schulze Niehoff

Entwicklung einer hochdynamischen, zweifachwirkenden Mikroumformpresse

Strahltechnik Band 33, Bremen 2008, ISBN 978-3-933762-25-2

Thorsten Bothe

Grundlegende Untersuchungen zur Formerfassung mit einem neuartigen Prinzip der Streifenprojektion und Realisierung in einer kompakten 3D-Kamera

Strahltechnik Band 32, Bremen 2008, ISBN 978-3-933762-24-5

F. Vollertsen, J. Sakkiettibutra (Hrsg.)

Thermal Forming and Welding Distortion

Strahltechnik Band 31, Bremen 2008, ISBN 978-3-933762-23-8

Herausgegeben von Frank Vollertsen

Michael Kreimeyer

Verfahrenstechnische Voraussetzungen zur Integration von Aluminium-Stahl-Mischbauweisen in den Kraftfahrzeugbau

Strahltechnik Band 30, Bremen 2007, ISBN 978-3-933762-20-7

Carsten Wochnowski

UV-laser-basierte Erzeugung von planaren, polymeren Bragg-Multiplexer-Strukturen

Strahltechnik Band 29, Bremen 2007, ISBN 978-3-933762-19-1

Herausgegeben von Frank Vollertsen, Werner Jüptner

Frank Vollertsen, Thomas Seefeld (Hrsg.)

Laserstrahlfügen: Prozesse, Systeme, Anwendungen, Trends

Strahltechnik Band 28, Bremen 2006, ISBN 978-3-933762-18-4

Frank Vollertsen (Hrsg.)

Prozessskalierung

Strahltechnik Band 27, Bremen 2005, ISBN 978-3-933762-17-7

Frank Vollertsen, Thomas Seefeld (Hrsg.)

Thermal Forming

Strahltechnik Band 26, Bremen 2005, ISBN 978-3-933762-16-0

Volker Kebbel

Untersuchung zur Erzeugung und Propagation ultrakurzer optischer Bessel-Impulse

Strahltechnik Band 25, Bremen 2004, ISBN 978-3-933762-15-3

Frank Vollertsen, Ferdinand Hollmann (Ed.)

Process Scaling

Strahltechnik Band 24, Bremen 2003, ISBN 978-3-933762-14-6

Emil Schubert

Untersuchungen zum Leichtbau mit Hilfe lasergestützter Mischbauweise

Strahltechnik Band 23, Bremen 2003, ISBN 978-3-933762-13-9

Christoph von Kopylow

Durchstimmbare Mikrokristall-Laser für die absolute Distanzinterferometrie

Strahltechnik Band 22, Bremen 2003, ISBN 978-3-933762-12-2

Carmen Theiler

Aufbau gradiert Nickelbasis-Chromkarbid-Verbundwerkstoffe durch Laserstrahl-Pulverbeschichten

Strahltechnik Band 21, Bremen 2003, ISBN 978-3-933762-11-5

Herausgegeben von Gerd Sepold, Werner Jüptner

Thomas Kreis (Hrsg.)

Werkzeug Laser – Industrieller Fortschritt durch wissenschaftliche Forschung

Strahltechnik Band 20, Bremen 2002, ISBN 978-3-933762-10-8

Gerd Sepold, Thomas Seefeld (Hrsg.)

Laserstrahlfügen: Prozesse, Systeme, Anwendungen, Trends

Strahltechnik Band 19, Bremen 2002, ISBN 978-3-933762-09-2

Gerd Sepold, Florian Wagner, Jürgen Tobolski

Kurzzeitmetallurgie

Strahltechnik Band 18, Bremen 2002, ISBN 978-3-933762-08-5 (vergriffen)

Frank Elandalousi

Modellgestützte Detektion und Analyse von Materialfehlern an technischen Objekten nach dem Prinzip „Erkennung durch Synthese“

Strahltechnik Band 17, Bremen 2002, ISBN 978-3-933762-07-8

Ingo Zerner

Prozessstabilisierung und Ergebnisse für das Laserstrahlfügen von Aluminium-Stahl-Verbindungen

Strahltechnik Band 16, Bremen 2001, ISBN 978-3-933762-05-4

Daniel Holstein

Ortsaufgelöste Charakterisierung von mechanischen Eigenschaften laserstrahlgeschweißter Verbindungen

Strahltechnik Band 15, Bremen 2001, ISBN 978-3-933762-04-7

Bernd Grubert

Untersuchung neuartiger Resonatorkonzepte für koaxiale Wellenleiterlaser

Strahltechnik Band 14, Bremen 2001, ISBN 978-3-933762-03-0

Martin Klassen

Prozessdynamik und resultierende Prozessinstabilitäten beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen

Strahltechnik Band 13, Bremen 2000, ISBN 978-3-933762-02-3

Ingo Engler

Verfahrenskombination Laserstrahlschweißen und -richten am Beispiel einer Titan-Leichtbaustruktur

Strahltechnik Band 12, Bremen 1999, ISBN 978-3-933762-01-6

Ulrike Mieth

Erscheinungsbild von Materialfehlern in holografischen Interferogrammen

Strahltechnik Band 11, Bremen 1998, ISBN 978-3-933762-00-9

Werner Jüptner (Hrsg.)

Laser von der Wissenschaft zur Anwendung

Strahltechnik Band 10, Bremen 1997, ISBN 978-3-9805011-4-9

Peter Andrä

Ein verallgemeinertes Geometriemodell für das Streifenprojektionsverfahren zur optischen 3D-Koordinatenmessung

Strahltechnik Band 9, Bremen 1998, ISBN 978-3-9805011-9-4

Thomas Franz

Laserstrahlschweißen mit Nd:YAG-Laser unter Wasser

Strahltechnik Band 8, Bremen 1998, ISBN 978-3-9805011-8-7

Sigurd Weise

Heißrissbildung beim Laserstrahlschweißen von Baustählen

Strahltechnik Band 7, Bremen 1998, ISBN 978-3-9805011-7-0

Gerd Sepold, Manfred Geiger (Hrsg.)

Strahl-Stoff-Wechselwirkung bei der Laserstrahlbearbeitung 2

Strahltechnik Band 6, Bremen 1998, ISBN 978-3-9805011-6-3

Werner Jüptner, Gerd Sepold (Hrsg.)

Lasermaterialbearbeitung im Transportwesen

Strahltechnik Band 5, Bremen 1997, ISBN 978-3-9805011-5-6

Carolin Renate Radscheit

Laserstrahlfügen von Aluminium mit Stahl

Strahltechnik Band 4, Bremen 1997, ISBN 978-9805011-3-2

Jürgen Breuer

UV-lasergestütztes Vorbehandlungsverfahren zur gezielten Modifizierung der Oberflächen von Polypropylen

Strahltechnik Band 3, Bremen 1996, ISBN 978-3-9805011-2-5

Bernd Heidenreich

Beitrag zum Laserstrahlbrennschneiden von großen Stahlblechen

Strahltechnik Band 2, Bremen 1995, ISBN 978-3-9805011-1-8

Christian Binroth

Beitrag zur Prozessstabilität beim CO₂-Laserstrahlschweißen von Aluminium mit Zusatzwerkstoffen

Strahltechnik Band 1, Bremen 1995, ISBN 978-3-9805011-0-1