



D I P L O M A R B E I T

Optische Überwachung des Laserstrahlfügens von Kunststoffen mit Metallen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs (Dipl.-Ing. oder DI), eingereicht an der TU Wien, Fakultät für
Maschinenwesen und Betriebswissenschaften von

Stefan Andreas RATH BSc

Mat.Nr.: 01225500

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl. -Ing. Dr.techn. Gerhard Liedl

betreut durch

Projektass. Dipl.-Ing. Gerald Humenberger

Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien

Mai 2019

Unterschrift

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung *Diplomarbeit* nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilungsperson in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachtungspersonen beurteilten Arbeit überein.

Wien, Mai 2019

Unterschrift

1 Motivation

Materialkombinationen aus Kunststoff und Metall sind in vielen technischen und industriellen Produkten wie in Flugzeugen, Automobilen, im Transportwesen, in Messgeräten und elektronischen Geräten weit verbreitet. Da bei solchen Verbindungen der Aspekt des Leichtbaus und die Effizienz eine wichtige Rolle spielen, ist der Kompromiss von Gewicht und den Eigenschaften hinsichtlich der Festigkeit immer abzuwägen [34].

Prinzipiell kann man sagen, dass Metalle und Kunststoffe zwei völlig unterschiedliche Werkstoffe sind. Sowohl Metalle als auch Kunststoffe haben in den verschiedenen Bereichen ihre Vor- bzw. auch Nachteile. Metalle sind dafür bekannt, über gute Eigenschaften hinsichtlich der Festigkeit, Zähigkeit und im Einsatz in hoch temperierter Umgebung zu verfügen. Im Gegensatz dazu sind Kunststoffe für ihr niedriges spezifisches Gewicht, ihre Korrosionsbeständigkeit und ihre gute Formbarkeit bekannt. Die Kombination dieser konträren Materialien stellt somit einen interessanten Aspekt hinsichtlich des Verbindungsprozesses als auch ihres Anwendungsbereiches dar [19]. Auf konventionellem Weg stehen mehrere Verbindungstechniken zur Verfügung. Meist wird auf mechanische Verbindungselemente wie Schrauben bzw. Nieten, oder auch auf Klebeverbindungen zurückgegriffen. Mechanische Verbindungen haben den Nachteil, dass es in den meisten Fällen zu einer Gewichtszunahme kommt. Des Weiteren sind hinsichtlich der Gestaltung von Bauteilen (z.B. aerodynamische Bauteile) Grenzen gesetzt [34]. Bei Klebeverbindungen besteht der Nachteil, dass durch flüchtige organische Verbindungen (VOC¹) Emissionen in unsere Umwelt gelangen. Dies bedarf einer strengen und ständigen Kontrolle der Fertigungsprozesse. Um qualitativ hochwertige Verbindungen zu gewährleisten, müssen auch bestimmte Umgebungsverhältnisse herrschen [19]. Im Speziellen sind hier Umgebungstemperatur, Feuchtigkeit als auch die mechanische Belastung während des Klebevorganges gemeint.

Es gibt auch ein neu entwickeltes Verfahren, das von den Autoren *Seiji Katayama und Yousuke Kawahito* im Buch, *Joining of Polymer – Metal Hybrid Structures* [19], in Kapitel 5 genauer beschrieben wird. Bei diesem Prozess wird ohne adhesive oder mechanische Elemente eine Verbindung zwischen den unterschiedlichen Werkstoffen aufgebaut. Dabei wird mit einem Laser gearbeitet, wobei es zu einer Bestrahlung der Grenzfläche, charakterisiert durch die im Verfahren verwendeten Werkstoffe, kommt. Dieses Verfahren wird auch als LAMP-Verbindungstechnologie² bezeichnet.

Grundgedanke dieser Arbeit ist es, durch dieses Verfahren eine belastbare Verbin-

¹VOC steht für „volatile organic compounds“

²Die Abkürzung LAMP steht für „Laser Assisted Joining of Metal and Plastic“

dung herzustellen und auf die Ursachen näher einzugehen bzw. den Prozess selbst zu untersuchen.

Für die optische Überwachung, speziell die Temperaturmessung, wird auch die Publikation *Analysis of short wavelength infrared radiation during laser welding of plastics* [24] herangezogen, um erste Richtwerte bezüglich der Erfassung der Infrarotstrahlungen zu bekommen. Dadurch wird versucht, aufgrund der Messwerte Temperaturbereiche zu definieren, bei denen es einerseits zu optimalen Eigenschaften hinsichtlich Zugfestigkeit kommt, und andererseits eine Vorhersage der zu erwartenden Festigkeit der Verbindung möglich ist.

2 Kurzfassung

In dieser Arbeit wurde auf den Verbindungsprozess von Metallen und Kunststoffen (LAMP-Verfahren) näher eingegangen. Unter anderem wurden die Entstehungsmechanismen bei der Verbindungsherstellung genauer untersucht. Bei diesem Verfahren wird ein Diodenlaser als Energiequelle verwendet, der in Kombination mit einem eigens konstruierten Bearbeitungskopf [31], die Laserstrahlung auf die Bearbeitungsfläche bündelt.

Bei den Versuchen handelt es sich um einen Überlappstoß, der aus den beiden Materialien Titan (Ti) und Polyethylenterephthalat-Glykol (PET-G) besteht. Diese Materialien wurden durch die Anwendung des LAMP-Verfahrens miteinander verbunden und eine belastbare Verbindung hergestellt.

Um eine korrekte Funktionsweise des Bearbeitungskopfes zu gewährleisten, wurden Testversuche gefahren bzw. die Ausgangsleistung gemessen. Hierbei wurde auch auf die Wärmeentstehung am Bearbeitungskopf geachtet, um mögliche Rückschlüsse auf Kollisionen des Strahlengangs mit der Innenseite der Bauteile zu erhalten. Weiters wurde die Strahlleistung mit dem vorher verwendeten Bearbeitungskopf verglichen.

Die Grundidee für die Versuche dieser Arbeit ist, den Einfluss der Oberflächenrauigkeit des Titans auf die sich ausbildende Zugfestigkeit der Verbindung zu untersuchen. Dabei wurden Proben unterschiedlichen Oberflächentyps auf Scherung belastet, um daraus die maximale Zugkraft zu ermitteln. Des weiteren wurden durch Temperaturmessungen an der Oberfläche und an der Grenzschicht die Entstehungsmechanismen beim Verbindungsprozess genauer analysiert. Durch diese Messungen der Temperatur konnten Temperaturbereiche definiert werden, in denen ein bestimmtes Verhalten der Verbindung zu erwarten war. Beispiele dafür sind die optimale Zugfestigkeit der Verbindung oder auch die entstehenden Konfigurationen der Naht.

Die gewonnenen Erkenntnisse dieser Arbeit sind ein wesentlicher Vorteil für die zukünftige Entwicklung eines Regelungssystems.

3 Abstract

The aim of this thesis was the investigation of the process of joining metal and plastic (LAMP-process). In this process, a diode laser was used as energy source. In combination with a specially designed processing head, the laser radiation was focused onto the joint area.

In the LAMP process, a lap joint of titanium and polyethyleneterephthalate-glycol (PET-G) was used for the samples.

To ensure the correct operating mode of the processing head for the laser, test specimens were produced and the output power was measured. In this case the generation of heat in the housing was also important. It provides information about the collision of the laserbeam with the inner components of the housing. Also a comparison with the before used processing head was done.

The basic idea for the experiments with lap joints was to investigate the connection between the two materials with different surface roughness of titanium. For classification the maximum strength of the joint was used. Therefore the samples with varying surface roughness got tested with shear load.

Additionally the temperature on the surface of plastic and the interface of the joint was measured to gain information about the underlying mechanism of the joining process. Based on this information, limited temperature ranges could be determined to predict properties of the joint. That can be for instance the strength of the joint or the different configuration of the weld. Furthermore an outlook of the occurred performance of the joint could be made.

The results gained from this work are an essential benefit for the future development of a control system.

4 Danksagung

Ein besonderes Dankeschön möchte ich an Herrn Prof. Dr. Gerhard Liedl aussprechen, der mir diese Arbeit ermöglicht hat und mir auch bei fachlichen Fragen und Abläufen immer zur Verfügung stand.

Ich möchte mich auch bei Dipl.-Ing. Gerald Humenberger ganz herzlich bedanken, der die Betreuung meiner Arbeit übernommen und mich im Verlauf dieser Arbeit tatkräftig unterstützt und auch bei auftretende Fragen immer ein offenes Ohr hatte.

Auch bei Herrn Dr. Thomas Koch möchte ich meinen Dank aussprechen, der mir die Laborräumlichkeit und die Zugprüfmaschine für meine Probenanalyse bereit gestellt hat.

Weiters möchte ich mich bei Herrn Manfred Boehm herzlich bedanken, der die Fertigung benötigter Teile für meine Versuche übernommen hat.

An Herrn Fachob. Johann Zotter möchte ich auch meinen Dank richten, der mir die Oberflächenpräparation der Proben ermöglicht hat.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meinen Eltern herzlichst Bedanken, welche mich während meiner gesamten Studienzeit tatkräftig unterstützt haben. Ohne sie wäre es mir nicht möglich gewesen, mich für diesen Weg zu entscheiden.

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation	III
2	Kurzfassung	V
3	Abstract	VI
4	Danksagung	VII
5	Grundlagen	1
5.1	Was ist Licht?	1
5.2	Laser	2
5.2.1	Laserprinzip	2
5.2.2	Verschiedene Lasertypen	5
5.2.3	Halbleiterlaser	6
5.3	Lasersicherheit	10
5.3.1	Unterteilung der elektromagnetischen Strahlung	10
5.3.2	Schutzmaßnahmen	11
5.3.3	Laserklassen	12
5.4	Wärmestrahlung	14
5.4.1	Strahlungseigenschaften idealer Körper	14
5.4.2	Strahlungseigenschaften realer Körper	14
5.4.3	Emissionsgrad	15
6	Verwendete Geräte	18
6.1	Laserquelle	18
6.2	Zugprüfmaschine	19
6.3	Wärmebildkamera	19
6.4	Rauigkeitsmessgerät	19
7	Versuchsaufbauten	20
7.1	Spannvorrichtung	20
7.2	Temperaturmessung	21
7.2.1	Messung mittels Infrarotkamera	21
7.2.2	Messung mittels Thermoelement	22
8	Probenherstellung	23
8.1	Grundprinzip	23
8.2	Praktische Anwendung	23
8.2.1	Mechanismus der Blasenbildung	24

8.2.2	Umgebung	25
8.2.3	Vorteile	25
8.2.4	Nachteile	25
8.3	Herstellung der Verbindung	26
9	Verwendete Werkstoffe	27
9.1	Titan	27
9.1.1	Eigenschaften	27
9.1.2	Konfigurationen	28
9.1.3	Zerspanung	28
9.1.4	Absorption	28
9.2	Polyethylenterephthalat-Glykol PET-G	32
9.2.1	Allgemeines Verhalten	32
9.2.2	Eigenschaften	33
10	Vorgehensweise	34
10.1	Inbetriebnahme des Bearbeitungskopfes	34
10.1.1	Einstellen des Objektabstandes	34
10.1.2	Nachjustierung des Tool-Center-Point TCP	36
10.1.3	Vermessung der Leistung am Austritt des Laserkopfes	39
10.2	Einfluss der Oberfläche	44
10.2.1	Oberflächenuntersuchung	44
10.2.2	Zugversuche: Oberflächenuntersuchung	45
10.3	Temperaturmessung	62
10.3.1	Versuchsdurchführung	62
10.3.2	Auswertung der Daten aus den Zugversuchen: Optimierte Naht- geometrie	69
10.3.3	Messung der Oberflächentemperatur	75
10.3.4	Untersuchung der Oberflächentemperatur für das gesamte Lei- stungsspektrum	78
10.3.5	Messung der Grenzflächentemperatur	86
11	Zusammenfassung und Ausblick	95
	Literatur- und Quellenverzeichnis	96
	Abbildungsverzeichnis	99
	Tabellenverzeichnis	104
12	Anhang	105
12.1	Niederhalter	105
12.2	PET-G	107
12.3	Strahlgranulat	110
12.4	FLIR-Wärmebildkamera	113
12.5	Thermoelement Typ K	116

5 Grundlagen

In diesem Kapitel wird auf die theoretischen Grundlagen näher eingegangen, die für diese Arbeit wesentlich sind.

5.1 Was ist Licht?

Licht gehört zu den elektromagnetischen Wellen, ist also Teil des elektromagnetischen Spektrums (Abbildung 5.1). Die Erscheinungen der Ausbreitung des Lichts lassen sich deshalb mit den Gesetzen der Wellenlehre erklären (z.B. Interferenz).

Das Licht wird uns zugestrahlt und vom Auge als Lichteindruck wahrgenommen. Dem menschlichen Auge sichtbar ist nur ein schmaler Wellenlängenbereich des elektromagnetischen Spektrums von 380 nm - 780 nm Wellenlänge. Dieses sichtbare Spektrum wird als Licht bezeichnet.

Im erweiterten Sinne zählen die für uns unsichtbaren kürzeren und längeren Wellen nicht zum Licht, sondern werden als elektromagnetische Wellen bzw. elektromagnetisches Spektrum definiert.

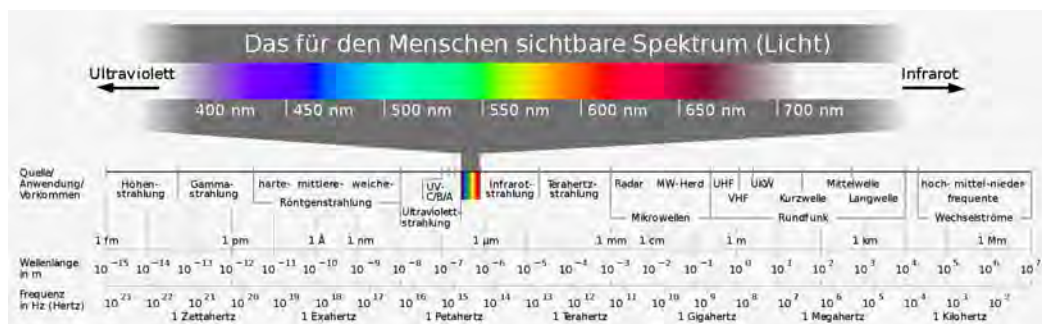


Abbildung 5.1: Elektromagnetisches Spektrum - Sichtbarer Bereich für das menschliche Auge [13]

Licht erscheint uns in verschiedenen Farben. Die Farbe wird durch die Wellenlänge bestimmt. An das sichtbare kurzwellige Licht schließt das unsichtbare Ultraviolett an. Das langwellige sichtbare Rot geht in das unsichtbare Infrarot über. Es wird auch Ultrarot genannt und gehört zu den Wärmestrahlen [4, S. 157 - 158].

Leider bedeutet dies nicht, dass nur Licht im sichtbaren Bereich in unser Auge eintritt. Vor allem oberhalb dieses Bereichs ($> 780 \text{ nm} - 1400 \text{ nm}$) wird diese unsichtbare

Strahlung auf die Netzhaut fokussiert und kann dort erhebliche Schäden verursachen. Schäden entstehen dann, wenn die maximale Intensität, die von der Strahlenquelle auf die Netzhaut fokussiert und absorbiert wird, das kritische Intensitätslimit übersteigt. Jedoch hängt dies wiederum mit der Dauer der Belichtung auf die Netzhaut zusammen.

In unserem Fall wird ein Diodenlaser mit einer Wellenlänge von 976 nm verwendet. Dies ist also Licht, welches nicht im sichtbaren Bereich liegt und somit zu einem erhöhtem Gefahrenpotential beiträgt. Mehr dazu aber im Unterpunkt für die Lasersicherheit.

Im unteren Bereich des Spektrums bis hin zum Anfang des sichtbaren Lichtes kann diese Strahlung zwar nicht auf die Netzhaut gelangen, jedoch kann hier der Linsenkörper als auch die Hornhaut in Mitleidenschaft gezogen werden [28, Kap. 12 - Folie 10].

5.2 Laser

Das Wort *LASER* steht für die Abkürzung *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* und bedeutet nichts anderes wie, Lichtverstärkung durch induzierte Emission von Strahlung.

Erstmalig konnte diese auf Einstein zurückgehende Idee im Jahr 1960 in Form eines Rubin-Lasers realisiert werden [23]. Vor dieser Zeit kannte man nur unsere Sonne, Glüh- und Gasentladungslampen als gebräuchliche Strahlungsquelle. Diese senden Licht in alle Raumrichtungen mit relativ unbestimmten Frequenzen aus, während der Laser einen gut gebündelten Strahl mit hoher Frequenzschärfe emittiert.

Die ungerichtete Strahlung konventioneller Lichtquellen ist eine Folge der statischen spontanen Emission der angeregten Atome der Quelle. Das besondere an emittierter Laserstrahlung ist, das aufgrund induzierter Emission eine ebene Lichtwelle mit genau definierter Frequenz entsteht [9, S. 53]. Außerdem muss erwähnt werden, dass diese Strahlung eine geringe Divergenz aufweist, also räumlich kohärent ist. Somit können weite Entfernungen zurückgelegt werden.

5.2.1 Laserprinzip

Ein Laser besteht im wesentlichen aus den drei Komponenten (Abb. 5.2):

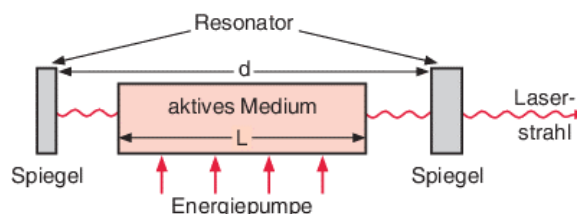


Abbildung 5.2: Aufbauprinzip eines Lasers [7, S. 271]

- **aktives Lasermedium**, in dem durch selektive Energiezufuhr in ein oder mehrere Niveaus eine invertierende (zum oberen Niveau gerichtete) Besetzungsverteilung erzeugt wird;
- **Energiepumpe**, welche diese Besetzungsinversion erzeugt (Blitzlampe, Gasentladung oder ein anderer Laser);
- **optischer Resonator**, der die vom aktiven Lasermedium emittierte Strahlung speichert bzw. sprichwörtlich *'hin und her'* schickt. Dies wird meist durch Spiegel realisiert, die die Photonen wieder in das aktive Medium zurückschicken und gleichzeitig einen gewissen Anteil zur Verarbeitung freigeben.

[7, Kapitel 8, S. 271].

Im nächsten Unterpunkt wird näher darauf eingegangen, wie und wodurch es zu einer Besetzungsinversion kommt. Dies geschieht allgemein durch Absorption, spontane und induzierte Emission von Photonen sowie durch Anheben der Atome in einen höheren Energiezustand.

a) Atomistische Deutung der Absorption und Emission

Der Vorgang der Absorption bzw. Emission kann atomistisch beschrieben werden. Atome oder Moleküle besitzen mehrere Energiezustände E_1, E_2, E_3, \dots , die sich in einem Energieniveauschema übersichtlich darstellen lassen (Abb. 5.3).

Im ungestörten Fall befinden sich alle Atome im Zustand der niedrigsten Energie E_1 , dem Grundzustand.

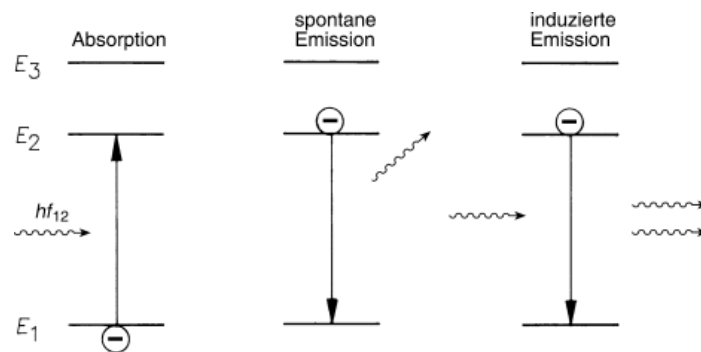


Abbildung 5.3: Darstellung von Absorption und Emission der Atome [9, S. 30]

Trifft nun ein Photon mit der Frequenz f_{12} auf ein Atom, so kann es in den höheren Energiezustand E_2 gehoben werden, falls die Bohr'sche Bedingung (Gl. 5.1)

$$E_2 - E_1 = h \cdot f_{12} \quad (5.1)$$

erfüllt ist.

Dem Licht wird dadurch ein Lichtquant mit der Energie $h \cdot f_{12}$ ¹ entzogen Für die

¹ h ist das Planck'sche Wirkungsquantum oder wird auch als Planck'sche Konstante bezeichnet. Der Wert h ist mit $h = 6,626 \cdot 10^{-34} Js$ definiert. [4]

Atome im höheren Energiezustand, also im angeregten Zustand, gibt es nun unterschiedliche Möglichkeiten:

- **spontane Emission:**
Die Atome im höheren Energiezustand E_2 fallen nach einer gewissen Zeit wieder in den Grundzustand zurück. Die dabei freiwerdende Energie kann als Lichtquant in eine beliebige Raumrichtung abgegeben werden. Dem System wird somit Energie entzogen. Dieser Prozess der Rückkehr des Atoms wird als spontane Emission bezeichnet. Die Rückkehr eines Atoms vom angeregten Zustand in den Grundzustand kann auch strahlungslos erfolgen (Abb. 5.3 - Mitte)
- **induzierte Emission:**
Die Rückkehr der angeregten Atome in einen tiefer liegenden Zustand kann durch äußere Einwirkung (es erfolgt keine Absorption) hervorgerufen werden. Hier muss die äußere Einwirkung des Lichtquants jedoch jener Energie entsprechen, bei der die Bohr'sche Bedingung (siehe Gl. 5.1) erfüllt wird. In diesem Fall wird beim Abfall des Atoms ein Lichtquant freigesetzt, dessen Energie und Raumrichtung dem Lichtquant der Einwirkung entspricht.

Die induzierte Emission ist der Umkehrvorgang der Absorption [9, S. 29 - 32].

b) Lichtverstärkung

Wenn nun die induzierte Emission bei einer Vielzahl von Atomen im aktiven Lasermedium eintritt, kann die dadurch hervorgerufene Freisetzung neuer Photonen wiederum andere angeregte Moleküle treffen. Dies veranlasst eine weitere Aussendung von Photonen. Da diese noch dazu im Resonator zirkulieren, kommt es folglich zu einer lawinenartigen Freisetzung von Photonen, die dann als Laserstrahlung bezeichnet bzw. genutzt werden kann.

c) Besetzungsinversion

Die für den Laserbetrieb notwendige Inversion der Besetzungsdichte muss durch einen eigenen Pumpprozess erfolgen. Dieser führt dazu, dass das obere Energieniveau E_i des Laserüberganges stärker bevölkert ist, als das untere. In Abbildung 5.3 ist dies auch grafisch dargestellt, wobei das höhere Energieniveau E_2 und das untere Energieniveau E_1 ist.

Die Pumpenergie kann entweder gepulst (Blitzlampen oder gepulste Gasentladung) oder zeitlich kontinuierlich zugeführt werden. Im ersten Fall erhält man nur für das Zeitintervall δt Laseremissionen, in dem die Schwellwertinversion überschritten wird (gepulster Laser). Im zweiten Fall lassen sich zeitlich kontinuierliche Laser (engl. continuous wave laser - CW-Laser) realisieren.

Die Schwellwertinversion wird durch die Schwellwertbedingung (siehe 5.2) definiert, welche durch eine Inversionsdichte N im aktiven Lasermedium bestimmt ist. Diese Schwellwertinversion ist dann erreicht, wenn mehr Moleküle den höheren Energiezustand durch Absorption von Photonen einnehmen, als durch die Bedingung 5.2

erforderlich ist. Unter anderem kommt es dabei zu einer Verstärkung des Lichts bei einem Umlauf im Resonator. Diese Photonen werden von der Pumpquelle erzeugt. Um einen Laserbetrieb zu ermöglichen, muss der Pumpquelle die dazu nötige Energie zugeführt werden. Abhängig ist dies auch vom Gesamtverlust der Welle im Resonator $\gamma(\nu)$, dem Absorptionsquerschnitt $\sigma(\nu)$ des Lasermediums und der Frequenz ν .

$$\Delta N_{Schwellwert} = \frac{\gamma(\nu)}{2 * \sigma(\nu) * L} \quad (5.2)$$

L entspricht der Länge des aktiven Mediums [7, S. 272-274].

5.2.2 Verschiedene Lasertypen

Bis heute sind etwa 10.000 Laserübergänge bekannt, deren Wellenlängenbereiche von 10 nm (UV) bis 1000 μm (IR) reichen. Kleine Laser haben eine Leistungsabgabe im μW bis mW Bereich. Hochleistungslaser findet man hingegen im MW-Bereich. Prinzipiell unterscheidet man zwischen Pulsbetrieb (pulse) und Dauerbetrieb (cw = continuous wave). Im cw-Betrieb wird normalerweise die Leistung der Strahlungsabgabe in Watt angegeben [23, S. 84].

Laser können nach verschiedenen Merkmalen klassifiziert werden. Oft wird eine Einteilung je nach Aggregatzustand des aktiven Lasermaterials getroffen:

- **Festkörperlaser:** aktives Medium sind Gläser oder Kristalle mit optisch anregbaren Atomen oder auch Ionen dotiert
- **Halbleiterlaser:** aktives Medium ist die Verarmungszone (Sperrschicht) einer p-n-Halbleiterdiode, die in Durchlassrichtung von Strom durchflossen wird
- **Flüssigkeitslaser:** als aktives Medium dienen Farbstoffmoleküle, die in Flüssigkeit gelöst sind
- **Gaslaser:** Gasentladung als aktives Medium
- **Freie Elektronenlaser:** beschleunigte Elektronen

[7, S. 283 - 288]

Bei den Festkörperlaser sind besonders die klassischen, optisch gepumpten Laser sowie die Halbleiterinjektionslaser bedeutend. Bei den Flüssigkeitslasern sind bisher nur die Farbstofflaser verbreitet. Das wichtigste Problem beim Aufbau eines Lasers ist die Anregung des aktiven Materials, die sogenannte Inversionserzeugung, die zur Lichtverstärkung führt. Die zur Anregung des Lasermediums notwendige Energie kann auf verschiedenste Weise zugeführt werden. Der erste Rubinlaser wurde durch Einstrahlung von Licht angeregt, was als Vorbild für viele weitere Laser diente. Man bezeichnet solche Geräte als optisch gepumpte Laser. In ähnlicher Weise können mit Elektronen- oder anderen Teilchenstrahlen angeregte Laser gebaut werden. Diese sind nicht mit

dem Freie-Elektronen-Laser zu verwechseln, bei dem die Elektronen selbst das Lasermedium darstellen.

Gase können durch elektrische Energiezufuhr angeregt werden, was zur Klasse der Gasentladungslaser führt. Eine direkte elektrische Anregung ist bei Halbleitern möglich, was die Klasse der Injektionslaser oder Diodenlaser ergibt.

Zusammenfassend unterscheidet man verschiedene Arten der Anregung eines Lasermaterials:

- **optisch gepumpte Laser:** Anregung mit Blitzlampe, kontinuierlicher Lampe, anderen Lasern, Leuchtdiode
- **elektronenstrahlgepumpte Laser:** realisiert bei Sonderformen von Gaslasern und Halbleiterlasern
- **Gasentladungslaser:** Glimm-, Bogen-, Hohlkathodenentladungen
- **Injektionslaser oder Diodenlaser:** Anregung durch Stromdurchgang in einem Halbleiter
- **chemische Laser:** Anregung durch chemische Reaktion
- **gasdynamische Laser:** Inversionserzeugung durch Expansion eines heißen Gases

Die dadurch entstehenden verschiedenen Lasersysteme haben unterschiedliche Eigenschaften [9, S. 54].

Im speziellen wird in dieser Arbeit auf die Funktion des Halbleiterlasers bzw. Diodenlasers etwas näher eingegangen.

5.2.3 Halbleiterlaser

Diodenlaser oder Halbleiterlaser sind fast so alt wie die ersten Laser. Die Vorteile der Halbleiterlaser sind ihre kleine Abmessung im Mikro- bis Millimeterbereich, die kleinen elektrischen Ströme und Spannungen sowie deren hoher Wirkungsgrad von bis über 50%. Laserdioden lassen sich direkt mit elektronischen Komponenten in komplexen Schaltkreisen integrieren bzw. auch direkt in Glasfasern einkoppeln [23, S. 118]. Halbleiterlaser können durch Zufuhr elektrischen Stroms angeregt werden [29]. Diese verwenden als aktives Medium eine p-n-Halbleiterdiode, die in Durchlassrichtung von Strom durchflossen wird.

a) Lichtverstärkung

Im Übergangsbereich zwischen n-Teil (hier herrscht Elektronenüberschuss) und p-Teil (hier herrscht Elektronenmangel, sog. Löcher) können die Elektronen aus einem energetisch höheren Zustand (Leitungsband) in einen freien Zustand mit tieferer Energie fallen (Abb. 5.4) [7]. Dies geschieht dadurch, dass durch den Strom in Durchlassrichtung eine Spannung U entsteht, die die Potentialdifferenz zwischen den Energiebändern verringert. Abbildung 5.5 zeigt die Potentiale der verschiedenen Dotierungen.

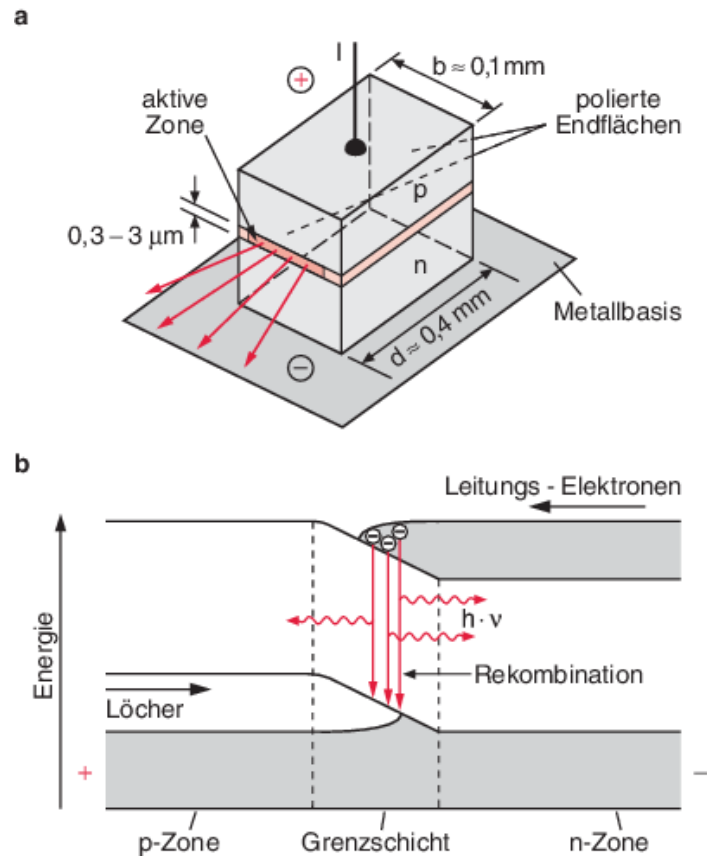


Abbildung 5.4: (a) Vereinfachter schematischer Aufbau eines Halbleiterlasers; (b) Energieniveauschema [7, S. 285]

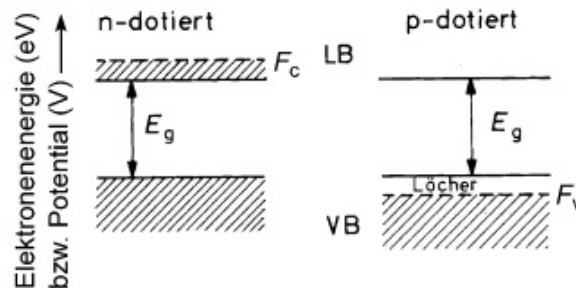


Abbildung 5.5: Darstellung der verschiedenen Potentiale von p- und n-Dotierung, E_g ... Bandlückenenergie, F_c bzw. F_v ... Fermienergie, LB ... Leitungsband, VB ... Valenzband [9, S. 180]

Es entsteht ein Fluss von Elektronen und positiven Löchern in entgegengesetzter Richtung. Freie Elektronen im Leitungsband driften in den p-Bereich (Gebiet Elektronenmangel) und positive Löcher im Valenzband in den n-Bereich (Gebiet Elektronenüberschuss) [9, S. 180].

Das bei dieser Rekombination emittierte Licht kann beim Durchgang durch die p-n-

Grenzschicht verstärkt werden. Wegen der großen Elektronendichte ist die Verstärkung (durch induzierte Emission) pro Weglänge sehr groß und es genügen Längen unter 1 mm, um die Laserschwelle zu überschreiten [7].

Bleibt man mit dem Anregungsstrom unterhalb des für die induzierte Emission notwendigen Schwellwerts, dann findet im p-n-Übergang nur spontane Emission statt und die Laserdiode arbeitet als LED. In Abbildung 5.6 kann man die beiden unterschiedlichen Bereiche gut erkennen.

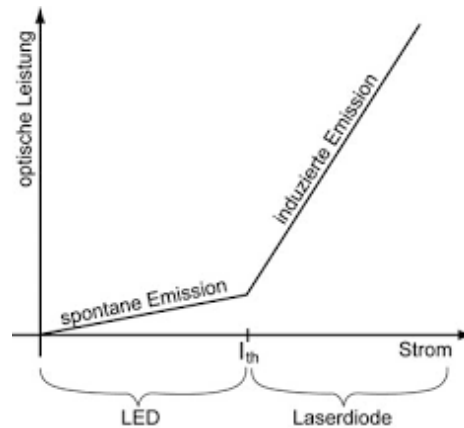


Abbildung 5.6: Abgestrahlte optische Leistung einer Laserdiode als Funktion des Anregungsstromes [23, S. 119]

Das gleiche Verhalten kann man auch im Intensitätsverlauf über das abgestrahlte Spektrum beobachten (Abb. 5.7). Während im LED-Betrieb das Spektrum relativ flach und breit um den Mittelwert verteilt ist, wird es im Betrieb als Laserdiode schlagartig verschmälert und der spektrale Peak wird scharf [23].

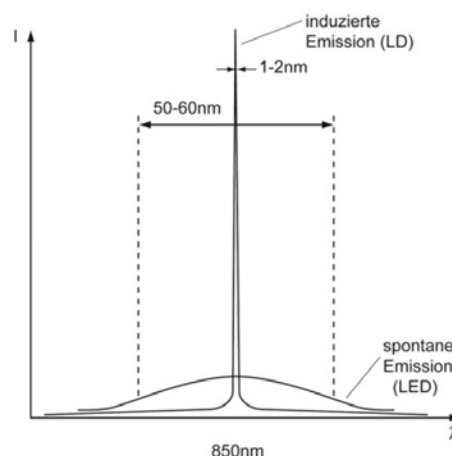


Abbildung 5.7: Spektrum unterhalb (LED) und oberhalb (Laserdiode) des Schwellwertes [23, S. 119]

Als Resonatorspiegel dienen oft die unbeschichteten Kristallflächen, die senkrecht zur Grenzschicht verlaufen.

Typische Ausgangsleistungen solcher Halbleiterlaser liegen bei 10-20 mW, wenn sie mit einem Strom von 100-200 mA gepumpt werden. Es gibt aber auch spezielle Anordnungen, die aus Diodenarrays bestehen. Diese können über 100 W Ausgangsleistung abgeben [7, S. 284-285].

b) Austritt der Strahlung

Die schmale aktive Zone zwischen p- und n-Gebiet bewirken am Austritt der Laserstrahlung aus dem Kristall starke Beugungserscheinungen. Da dieser Spalt normalerweise eine andere Breite als Höhe aufweist, kommt es zu einer elliptischen Aufweitung (Divergenz) des Strahls (siehe auch Abb. 5.8).

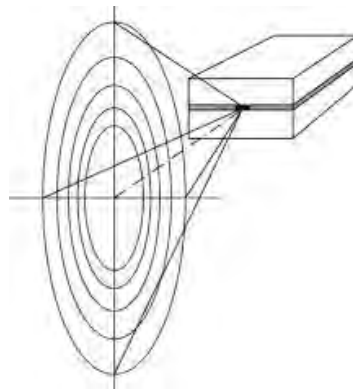


Abbildung 5.8: Räumliche Abstrahlung einer Laserdiode [23, S. 120]

Die räumliche Abstrahlcharakteristik ist im Vergleich zu anderen Lasern einer der wesentlichen Unterschiede von Halbleiterlasern. Während herkömmliche Laser durch den Resonator von Haus aus einen stark gebündelten Strahl mit geringer Divergenz aussenden (in der Größenordnung von millirad), benötigt man bei Laserdioden immer Vorsatzoptiken zur Formung eines gebündelten Strahls. Ein weiterer Unterschied ist die geringe Kohärenz von Laserdioden verglichen mit herkömmlichen Lasern [23, S. 120].

Lichtwellen sind kohärent, wenn die Zeitabhängigkeit ihrer elektrischen Felder $E_1(t)$ und $E_2(t)$ bis auf eine Phasenverschiebung τ die gleiche ist. Sprich, es muss gelten, $E_2(t) = \text{const} \cdot E_1(t + \tau)$ [11, Kapitel 11, S. 533].

Aufgrund von Temperatur- und Geometrieinflüssen unterliegt die Frequenz von Laserdioden einer gewissen Verschmierung und es schwingen meist mehrere Mode. Dadurch erreichen Laserdioden Kohärenzlängen im Bereich von mm bis cm, während stabilisierte HeNe-Laser ohne weiteres Kohärenzlängen bis weit in den km-Bereich haben [23, S. 120].

5.3 Lasersicherheit

Für den vorschriftsmäßigen und sicheren Einsatz von Lasern gibt es eine europäische Norm, die DIN EN 60825-1. Außerdem hat die Berufsgenossenschaft in Deutschland die viel pragmatischere Unfallverhütungsvorschrift *Laserstrahlung BGV B2* veröffentlicht und ist frei verfügbar.

5.3.1 Unterteilung der elektromagnetischen Strahlung

Worin besteht nun die Gefahr von Laserstrahlung für den Menschen? Zunächst sei hier das Auge betrachtet. In Abbildung 5.9 sind die verschiedenen Eindringtiefen elektromagnetischer Strahlung in das Auge dargestellt. Laserstrahlung im UV-C und UV-B Bereich (180 nm bis 315 nm) wird bereits von der Hornhaut des Auges absorbiert und kann dort zu Entzündungen führen (z.B. Verblitzen beim Schweißen). UV-A Strahlen (315 nm bis 400 nm) dringen schon weiter in das Auge ein und können eine Linsentrübung hervorrufen. Für den gesamten sichtbaren Bereich (VIS) bis zum IR-A Bereich (400 nm bis 1400 nm) ist das Auge transparent und die Laserstrahlung wird durch die Linse auf die Netzhaut fokussiert. Der sichtbare Bereich des menschlichen Auges liegt bei ungefähr 380 nm bis 780 nm.

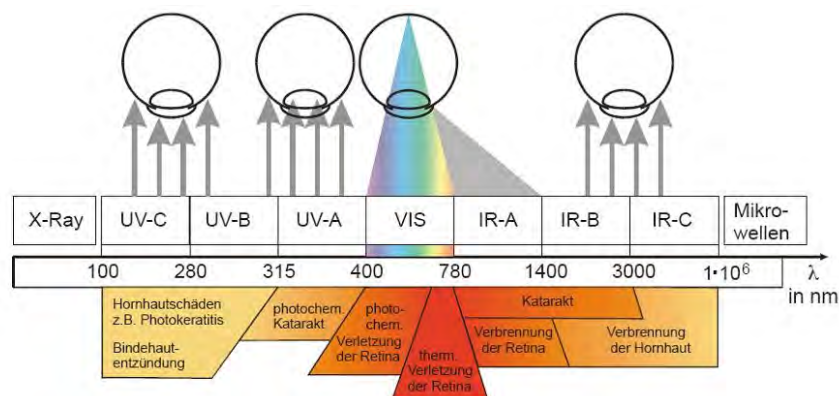


Abbildung 5.9: Darstellung der verschiedenen Eindringtiefen elektromagnetischer Strahlung in das Auge [12]

Der dort entstehende Brennfleck hat einen ungefähren Durchmesser von 10 μm . Wenn man nun einen Pupillendurchmesser von ungefähr 1 - 5 mm annimmt und den Verstärkungsfaktor der Strahlung berechnet, dann würde dies zu einer Erhöhung der Leistungsdichte auf der Netzhaut um den Faktor 10.000 bis 250.000 führen. Das bedeutet, dass bereits kleine Leistungen von wenigen mW ausreichen, Verbrennungen an der Netzhaut und damit bleibende Schäden hervorzurufen. Für den IR-B und IR-C Bereich (1,4 μm bis 1 mm) wird die Strahlung wieder von Linse und Hornhaut absorbiert und kann dort zu Verbrennungen führen.

Bei entsprechender Laserleistung ist aber auch die Haut gefährdet. UV- und sichtbare Strahlung können zu Sonnenbrand, beschleunigten Alterungsprozessen und Pig-

mentdunkelungen führen. IR-Strahlung dringt auch hier nicht so tief ein und kann Hautverbrennungen an der Oberfläche bewirken [23, S. 115].

5.3.2 Schutzmaßnahmen

Wichtigste Schutzausrüstung beim Arbeiten mit Lasern ist eine geeignete Laserschutzbrille. Die Laserschutzbrillen sind nur wirksam in den spezifizierten Wellenlängenbereichen und Leistungsstufen. Diese sind genormt in DIN EN 207.

Es gibt zehn Schutzstufen von $L1$ bis $L10$, wobei die Ziffer die Abschwächung als Exponent zur Basis 10 angibt. So bedeutet z. B. $L5$ eine Abschwächung um den Faktor 10^5 . Bestimmungsgemäß eingesetzt muss eine Schutzbrille dem Laserstrahl mindestens 10 s widerstehen. Alle Laserschutzbrillen müssen entsprechend klassifiziert und beschriftet sein. Ein Beispiel ist in Tabelle 5.1 gegeben [23, S. 115].

Betriebsart	Wellenlängen nm	Schutzstufe	Hersteller	Prüfzeichen	Festigkeit
D	690 - 1320 nm	L6	LW	DIN	S

Tabelle 5.1: Kennzeichnungsbeispiel einer Laserschutzbrille: D -Dauerstrichbetrieb bei der Verwendung im zulässigen Wellenlängenbereich [28]

Auch diverse Schutzmaßnahmen helfen dabei, sich selbst und andere Personen vor gefährlicher Laserstrahlung zu schützen. Dazu zählen:

- **bauliche Schutzmaßnahmen:** Abgrenzungen, Warneinrichtungen, Fenster verkleiden, Zugang sichern, Absaugung
- **organisatorische Schutzmaßnahmen:** Anmeldung, deutliche Kennzeichnung, Dokumentation, Schutzausrüstung, Überwachung der Einhaltung der Sicherheitsbestimmungen, ärztliche Versorgung
- **apperative Schutzmaßnahmen:** Gehäuse, Sicherheitsverriegelung, Kennzeichnung

Man sollte aber auch die sekundären Gefährdungspotentiale nicht außer Acht lassen. Denn auch diese sind essentiell wichtig für Arbeitssicherheit. Darunter versteht man folgendes:

- Temperaturbelastung
- Feuchtigkeit, Nässe
- Stöße bzw. Vibrationen
- Rauch, Stäube und Dämpfe bei der Bearbeitung (Partikelgröße entscheidend)
- elektromagnetische Störung

- mechanische und elektrische Gefährdungen
- Gefährdung durch Stoffe, die für den Betrieb der Maschine Verwendung finden

[28].

5.3.3 Laserklassen

Die Laser werden ab 01.01.2004 je nach Gefährdungspotential in sieben Klassen eingeteilt. Von Klasse 1 bis 4 werden die Laser immer gefährlicher. Die Klassifizierung muss von außen sichtbar, direkt am Laser angebracht sein. Im folgenden werden die einzelnen Laserklassen kurz beschrieben [23].

Laserklasse 1

Die zugängliche Strahlung ist ungefährlich [9].

Laserklasse 1M

Das M steht für magnification (aufgeweitete Strahlen). Diese Klasse ist auf den Wellenlängenbereich von 302,5 nm bis 4.000 nm beschränkt. Unter vorhersehbaren Betriebsbedingungen sind diese Laser sicher. Das Beobachten des Strahls mit optischen Instrumenten kann aber für den Benutzer gefährlich sein. Mit einer Lupe könnte man z.B. mehr Licht aus dem aufgeweiteten Strahl sammeln und ins Auge bringen, als mit dem Auge alleine [23].

Laserklasse 2

Diese Klasse gilt nur für Laser im sichtbaren Wellenlängenbereich von 400 nm bis 700 nm. Laser dieser Klasse sind bei einer Bestrahlung bis 0,25 s (Lidschlussreflex) ungefährlich. Die Leistungsgrenze liegt für kontinuierlich strahlende Laser bei 1 mW [9].

Laserklasse 2M

Diese Klasse gilt ebenfalls nur für Laser mit Wellenlängen von 400 nm bis 700 nm. Laser dieser Klasse sind bei einer Bestrahlung bis 0,25 s (Lidschlussreflex) ungefährlich, soweit keine optischen Instrumente verwendet werden [9].

Laserklasse 3R

Das Symbol R steht hier für relaxiert. Relaxiert bedeutet eine verzögerte Einnahme eines neuen Gleichgewichtszustandes. Die Klasse 3R gilt für den Wellenlängenbereich von 302,5 nm bis 1.000 μm . Der direkte Blick in den Strahl kann gefährlich sein [23].

Laserklasse 3B

Der direkte Blick in den Strahl ist gefährlich, die Beobachtung von diffusen Reflexionen ist üblicherweise sicher [23].

Laserklasse 4

Diese Laser sind gefährlich für Augen und Haut. Ihre Anwendung erfordert äußerste Vorsicht! Die Strahlung kann zu Brandschäden führen und auch diffus gestreute Strahlung kann noch gefährlich sein [23].

Eine Zusammenfassung für die verschiedenen Gefährdungspotentiale in den einzelnen Laserklassen ist in Abbildung 5.10 dargestellt. In der Auflistung entspricht die *Kurzzeitbestrahlung* der Dauer der Bestrahlung bis 0,25 s (Lidschlussreflex).

	Direkte Langzeitbestrahlung		Direkte Kurzzeitbestrahlung		Diffuse Reflexion		Direkte Bestrahlung
	opt. Inst.	freies Auge	opt. Instr.	freies Auge	Auge	Haut	Haut
Klasse 1	sicher	sicher	sicher	sicher	sicher	sicher	sicher
Klasse 1M		sicher		sicher	sicher	sicher	sicher
Klasse 2			sicher	sicher	sicher	sicher	sicher
Klasse 2M				sicher	sicher	sicher	sicher
Klasse 3R			Geringes Risiko	Geringes Risiko	sicher	sicher	sicher
Klasse 3B					Geringes Risiko	sicher	Geringes Risiko
Klasse 4							

Abbildung 5.10: Übersicht der Gefährdungspotentiale in den einzelnen Laserklassen [15]

Breibt ein Unternehmer Lasereinrichtungen der Klassen 3R, 3B oder 4, muss er dies beim Unfallversicherungsträger und der entsprechenden Behörde (Gewerbeaufsichtsamt) anzeigen. Außerdem muss der Unternehmer einen Laserschutzbeauftragten innerhalb seiner Einrichtung bestellen. Die notwendige Qualifikation und die Aufgaben eines Laserschutzbeauftragten sind in der BGV B2 detailliert aufgelistet.

Es bleibt der Rat zum Schluss: *Im Umgang mit Laserstrahlung zu vorsichtig sein schadet nicht* [23].

5.4 Wärmestrahlung

Die Wärmestrahlung eines Körpers wird in Form von Energie durch elektromagnetische Wellen an seine Umgebung abgegeben. Diese Abgabe an Strahlungsenergie wird auch Temperaturstrahlung, thermische Strahlung oder Wärmestrahlung genannt. Emission oder Aussendung von Strahlung bedeutet eine Umwandlung der inneren Energie des Körpers in Strahlungsenergie. Diese wird durch elektromagnetische Wellen abgegeben.

Trifft hingegen ein Körper auf eine Quelle elektromagnetischer Strahlung wird diese je nach Eigenschaften absorbiert, reflektiert bzw. transmittiert. Der absorbierte Teil der Strahlungsenergie wird in innere Energie umgewandelt.

Im Grunde bewirkt die Wärmestrahlung eine besondere Art der Wärmeübertragung, die als Strahlungsemission bezeichnet werden kann. Zum Strahlungstransport selbst ist keine Materie erforderlich [2, S.28].

5.4.1 Strahlungseigenschaften idealer Körper

Für die Beschreibung der Strahlungseigenschaften idealer Körper wird die Wärmestrahlung herangezogen. Im Idealfall gibt es eine obere Grenze der maximalen Wärmestrahlung, die nur von der thermodynamischen Temperatur des strahlenden Körpers abhängt. Die maximal mögliche Wärmestromdichte der von einer Oberfläche emittierten Strahlung ist durch

$$\dot{q}_s = \sigma \cdot T^4 \quad (5.3)$$

gegeben. Sie enthält eine universelle Konstante, die Stefan-Boltzmann-Konstante σ , deren Bestwert

$$\sigma = (5,670400 \pm 0,00004) \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \quad (5.4)$$

beträgt.

Ein Körper, der mit der Wärmestromdichte \dot{q}_s emittiert heißt Schwarzer Körper. Er ist ein idealer Strahler, dessen spezifische Aussendung von Strahlung von keinem anderen Körper gleicher Temperatur übertroffen werden kann. Der Schwarze Körper ist somit der Idealfall für die Emission von Wärmestrahlung.

Umgekehrt absorbiert der Schwarze Körper jede auftreffende Strahlung. [2, S.29].

5.4.2 Strahlungseigenschaften realer Körper

In der Realität verhalten sich die Strahlungseigenschaften von Körpern unterschiedlich zu dem eines Schwarzen Körpers. Um diese Abweichungen zu beschreiben, definiert man den Emissionsgrad ϵ .

Wenn ein realer als auch ein Schwarzer Körper ($\epsilon=1$) mit gleicher thermodynamischer Temperatur vorliegen, dann ist die Abgabe an Wärmestrahlung der beiden Körper unterschiedlich. Die Wärmestromdichte der emittierten Wärmestrahlung des realen

Strahlers ist geringer als die des idealen Körpers, obwohl gleiche Temperaturverhältnisse vorliegen [2].

Die Wärmestromdichte eines realen Körpers kann durch

$$\dot{q}_s = \epsilon \cdot \sigma T^4 \quad (5.5)$$

definiert werden. Zusammenfassend geben reale Körper weniger Information hinsichtlich ihrer Temperatur bekannt, als ideale Körper.

5.4.3 Emissionsgrad

Die Strahlungseigenschaft eines strahlungsundurchsichtigen Körpers wird durch seinen gerichteten spektralen Emissionsgrad $\epsilon_\lambda = \epsilon_\lambda(\lambda, \beta, \phi, T)$ erfasst. Dieser Emissionsgrad beschreibt die Richtungs- und Wellenlängenverteilung des emittierten Strahlungsflusses, während der hemisphärische spektrale Emissionsgrad $\epsilon_\lambda(\lambda, T)$ nur die spektrale Energieverteilung angibt. Der gerichtete Gesamt-Emissionsgrad $\epsilon(\beta, \phi, T)$ beschreibt nur die Verteilung auf die Raumwinkel des Halbraumes.

Der hemisphärische Gesamt-Emissionsgrad $\epsilon(T)$, oder auch nur Emissionsgrad genannt, gibt nur das Verhältnis der spezifischen Ausstrahlungen $M(T)$ eines realen und Schwarzen Körpers an. Die spektrale spezifische Ausstrahlung $M_{\lambda S}(\lambda, T)$ eines Körpers wird durch das Gesetz von Planck beschrieben und hängt von der Wellenlänge λ als auch von der Temperatur T ab. Das Gesetz von Planck für die spektrale spezifische Abstrahlung ist in Abbildung 5.11 dargestellt.

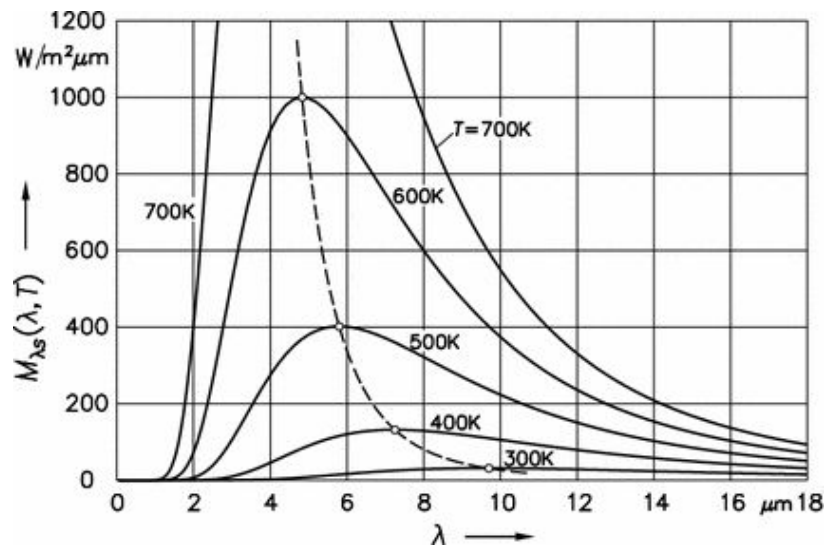


Abbildung 5.11: Darstellung der spektralen spezifischen Ausstrahlung des Schwarzen Körpers nach dem Planck'schen Gesetz [2, S. 644]

Man kann bei der grafischen Darstellung für das Gesetz von Planck erkennen, dass sich das Maximum für die spektrale Abstrahlung bei höher werdender Temperatur zu kleineren Wellenlängen verschiebt.

Für die Bestimmung des spektralen Emissionsgrades $\epsilon_\lambda = \epsilon_\lambda(\lambda, \beta, \phi, T)$ sind umfangreiche Messungen erforderlich. Die Abhängigkeit von der Wellenlänge, der Richtung und der Temperatur muss berücksichtigt werden. Diese derart umfassenden Messungen sind bisher für keinen Stoff ausgeführt worden.

Man beschränkt sich häufig auf die Bestimmung des Emissionsgrades in Richtung der Flächennormalen ($\beta = 0$), des Emissionsgrades für wenig ausgewählte Wellenlängen oder misst nur den hemisphärischen Gesamt-Emissionsgrad $\epsilon(T)$.

Zur Unvollständigkeit der Strahlungsmessung kommt als weitere Schwierigkeit die starke Abhängigkeit von der Oberflächenstruktur hinzu. Neben Rauigkeit spielen auch Verunreinigungen eine Rolle. Schon ein sehr dünner Wasserfilm oder eine Oxidschicht kann das Strahlungsverhalten gegenüber dem Grundmaterial völlig verändern.

Angesichts der experimentellen Schwierigkeiten ist es durch die auf Maxwell zurückgehende klassische Theorie der elektromagnetischen Wellen möglich, den Emissionsgrad ϵ_λ mit den optischen Konstanten der Materie wie der Brechzahl n und der Absorptionzahl k (auch Extinktionskoeffizient) in Verbindung zu bringen. Die optischen Konstanten bilden gemeinsam die komplexe Brechzahl $n_k = n - i \cdot k$ und sind von der Temperatur, der Wellenlänge und deren elektrischen Eigenschaften abhängig [2].

Durch die beiden optischen Kennwerte ergeben sich grundsätzlich zwei Materialien, nach denen unterschieden wird:

- Elektrische Nichtleiter (Dielektrika):
typische Werte: $n = 2 - 4$, $k = 0$
- Elektrische Leiter (Metalle):
typische Werte: $n = 3 - 25$, $k > 0$

Die Brechzahl n wird auch als Refraktionszahl bezeichnet. Die Refraktionszahl wird im Datenblatt des Kunststoffes angegeben (siehe 12.2). Theoretische Überlegungen ergeben erste Anhaltswerte für die Emissionsgrade, indem diese mit den optischen Komponenten der Materialien, verbunden werden. Für den gerichteten spektralen Emissionsgrad normal zur strahlenden Fläche gilt auf Basis der elektromagnetischen Theorie

$$\epsilon_{\lambda\omega,n} = \frac{4 \cdot n}{(n + 1)^2 + k^2} \quad (5.6)$$

[16, S. 173].

Leider gilt die elektromagnetische Theorie nur unter einer Reihe einschränkender Voraussetzungen, sodass sich die daraus ergebenden Emissionsgrade häufig nicht mit der Realität überschneiden. Trotzdem liefert sie wichtige, quantitativ gültige Aussagen, die zur Abschätzung oder Extrapolation von Messwerten beitragen [2, S. 661].

a) Werte für den Emissionsgrad

Abbildung 5.12 zeigt die Emissionsgrade einiger Materialien. Vor allem kann man erkennen, dass der hemisphärische Gesamt-Emissionsgrad $\epsilon(T)$ bei Metallen größer als

der Emissionsgrad normal zur Oberfläche ist. Bei Nichtmetallen ist dies genau umgekehrt.

Oberfläche	T in K	ϵ_n	ϵ
Metalle			
Aluminium, walzblank	443	0,039	0,049
	773	0,05	
Aluminium, stark oxidiert	366	0,2	
	777	0,31	
Blei, nicht oxidiert	400	0,057	
	500	0,075	
Blei, grau oxidiert	297	0,28	
Chrom, poliert	423	0,058	0,071
	1089	0,36	
Eisen, hochglanzpoliert	450	0,052	
Eisen, vorpoliert	373	0,17	
Eisen, rot angerostet	293	0,612	
Gold, hochglanzpoliert	500	0,018	
	900	0,035	
Gusseisen, poliert	473	0,21	
Gusseisen, oxidiert	472	0,64	
Kupfer, poliert	293	0,03	
Kupfer, leicht angelaufen	293	0,037	
Kupfer, schwarz oxidiert	293	0,78	
Messing, nicht oxidiert	298	0,035	
	373	0,035	
Messing, oxidiert	473	0,61	
	873	0,59	
Nickel, nicht oxidiert	298		0,045
Nickel, oxidiert	473		0,37
	873		0,478

Oberfläche	T in K	ϵ_n	ϵ
Platin	422	0,022	
	1089	0,123	
Silber, poliert	311	0,022	
	644	0,031	
Titan, oxidiert	644		0,54
	1089		0,59
Zink, rein poliert	500	0,045	
Nichtmetalle			
Beton, rauh	300		0,94
Eis, glatt mit Wasser	273	0,966	0,92
Eis, rauher Reifbelag	273	0,985	
Emaille, weiß auf Eisen	292	0,897	
Glas	293	0,94	
Gummi	293	0,92	
Holz, Buche	343	0,94	0,91
Lack, weiß	373	0,925	
Lack, matt schwarz	353	0,97	
Mennigeanstrich	373	0,93	
Ölfarbe, weiß	366		0,94
Ölfarbe, schwarz	366		0,92
Papier	273		0,92
Porzellan, weiß	295		0,924
Wasser	273	0,95	
Ziegelstein, rot	300		0,93

Abbildung 5.12: Darstellung von Emissionsgraden technischer Oberflächen [18, S. 317]

Allgemein kann für fast alle Kunststoffe ein Emissionsgrad zwischen 0,8 und 0,95 angenommen werden. In diesem Bereich sind auch die Emissionsgrade der meisten Hersteller, die sich im Bereich der Temperaturmessung mittels Infrarotstrahlung beschäftigen, zu finden (siehe auch [32], [27] und [10]).

6 Verwendete Geräte

6.1 Laserquelle

In den Versuchen wird ein Diodenlaser als Laserquelle mit einer Wellenlänge von 976 nm verwendet. Für die Transformation des Strahlengangs wird ein eigens konstruierter Bearbeitungskopf [31] verwendet, der durch eine eingesetzte Zylinderlinse im Idealfall eine Brennlinie erzeugt. In Abbildung 6.1 ist der Laserkopf, montiert an einem Roboterarm zu erkennen.

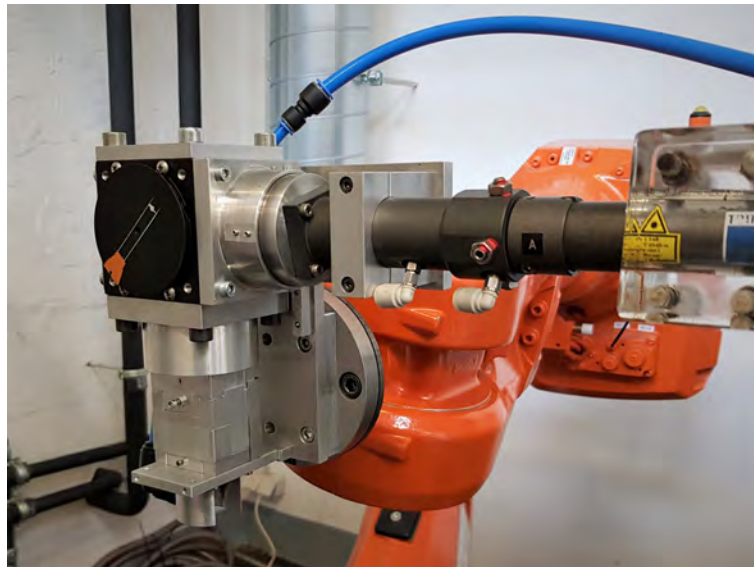


Abbildung 6.1: Darstellung des eigens konstruierten Laserbearbeitungskopfes, montiert an einem Roboterarm von ABB

Die Abmessungen des Strahlprofils im Brennpunkt sind laut RMS-Radius (Definition siehe [31, S. 26]) mit 9,2 mm x 0,43 mm definiert (siehe Abb. 6.2). Somit kann bei einmaliger Bearbeitung, eine wesentlich breitere Verbindung erzielt werden.

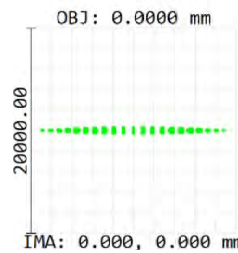


Abbildung 6.2: Darstellung des theoretisch entstehenden Strahlenprofils (berechnet durch ZEMAX) durch die Zylinderlinse [31]

6.2 Zugprüfmaschine

Bei der Zugprüfmaschine handelt es sich um die ZWICK Z050. In den Versuchen wurden die Proben bei einer Temperatur von 22 °C belastet und die Daten über eine Schnittstelle auf den Computer übertragen.

Bei den Zugversuchen wurde mit einer Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min und einer Einspannlänge von 64 mm gearbeitet. Bei dem auf Scherung belasteten Querschnitt wurde auf den Spannungsquerschnitt zurückgegriffen, der mittels Bildanalyse ermittelt wurde.

Die Klemmvorrichtungen der Einspannungen sind für eine maximale Kraft von 12,5 kN ausgelegt. Bei der Einspannung wurde darauf geachtet, die Probe möglichst gerade auszurichten, um keinen weiteren Spannungszustand in der Verbindungsnaht zu erzeugen.

6.3 Wärmebildkamera

Für die Messung der Oberflächentemperatur wurde eine Wärmebildkamera verwendet, die Wärmestrahlung zwischen 8 - 14 μm verarbeitet. Bei der IR-Kamera handelt es sich um die *FLIR – One – Pro* die sowohl Wärmebild als auch normales Bild im optischen Spektralbereich aufnimmt. Dadurch sind Bilder mit erhöhter Konturschärfe möglich. Die genauen Spezifikationen sind im Anhang des Kapitels 12.4 enthalten.

Für den Koeffizient des Emissionsgrades bei der Kunststoffoberfläche ϵ wurde mit 0,93 gearbeitet.

6.4 Rauigkeitsmessgerät

Für das Messen der Rauigkeit der Oberflächen wurde das Rauigkeitsmessgerät *Mitutoyo Surf-test – 211* verwendet. Das Gerät arbeitet mit einer Prüfnadel, die durch einen speziellen Federmechanismus auf der Oberfläche aufliegt. Um den Mittenrauwert R_a zu ermitteln, wird durch einen Antrieb die Nadel entlang einer definierte Strecke bewegt und dabei die Rauigkeitsspitzen der Oberfläche analysiert.

7 Versuchsaufbauten

In diesem Kapitel wird auf den im Versuch verwendeten Aufbau näher eingegangen.

7.1 Spannvorrichtung

Für das Spannen der beiden Materialien wird eine Vorrichtung verwendet, die aus einem Niederhalter und einer Spannplatte besteht. Die Spannplatte dient dabei nur als Auflage. Die Hauptaufgabe des Niederhalters ist es, eine spaltfreie Auflage in der Verbindungszone zu erzeugen. Gleichzeitig werden die Proben durch den Niederhalterdruck fixiert, damit keine Bewegung während des Verbindungsprozesses möglich ist. Durch das LAMP-Verfahren kommt es zur Bläschenentstehung, die in Folge der Expansion der Bläschen Druckkräfte freisetzt, die zum Abheben des Kunststoffes führen würde. Dies wird durch den Niederhalter verhindert.

Der Niederhalter wird mit vier Schrauben auf die Verbindung gedrückt. Um reproduzierbare Ergebnisse zu bekommen, werden die an den Eckpunkten positionierten Schrauben mit einem konstanten Drehmoment von $0,5 \text{ Nm}$ angezogen.

Der Niederhalter selbst ist mittig mit einer Ausnehmung versehen, welches ein Belichten des Lasers für die Herstellung der Verbindung ermöglicht.

Zusätzlich zu diesen Eigenschaften übernimmt der Niederhalter die Funktion der Zentrierung der Proben.

Für die Verbindung wurden Titan mit den Abmessungen $35 \text{ mm} \times 72 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ und PET-G mit den Abmessungen von $30 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ verwendet. Nach dem Verbindungsprozess wurde der Kunststoff auf 84 mm gekürzt, um bessere Einspannverhältnisse bei der nachfolgenden Zugprüfung zu bekommen.

In Abbildung 7.1 ist der Aufbau bildlich dargestellt. Für die bessere Sichtbarkeit des transparenten Kunststoffes ist die Schutzfolie an beiden Oberflächen des Kunststoffes belassen worden.

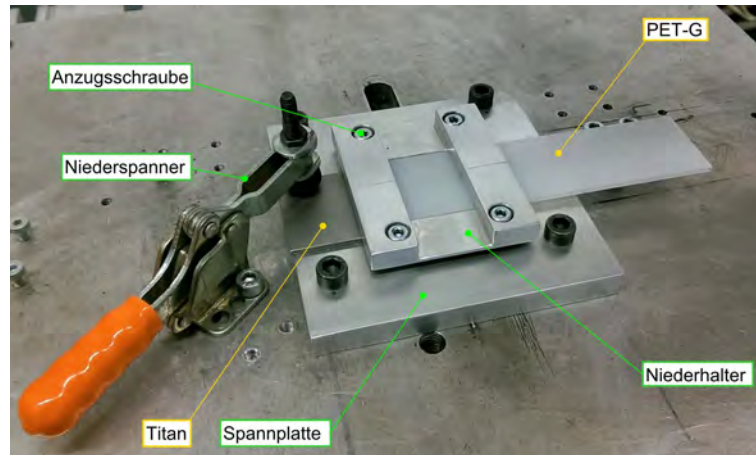


Abbildung 7.1: Darstellung der Aufspannvorrichtung für die Spannung der Verbindungselemente: Ti und PET-G

Die genauen Abmessungen bzw. die Zeichnung des Niederhalters sind im Kapitel 12.1 des Anhangs enthalten.

7.2 Temperaturmessung

7.2.1 Messung mittels Infrarotkamera

Die FLIR One Pro wurde mit einer Vorrichtung montiert, sodass Wärmebilder der Oberfläche des Kunststoffes erfasst werden konnten. Die Kamera wurde in einem Winkel von 36° zur vertikalen Ebene der optischen Achse des Lasers positioniert. In Abbildung 7.2 ist dies grafisch dargestellt.

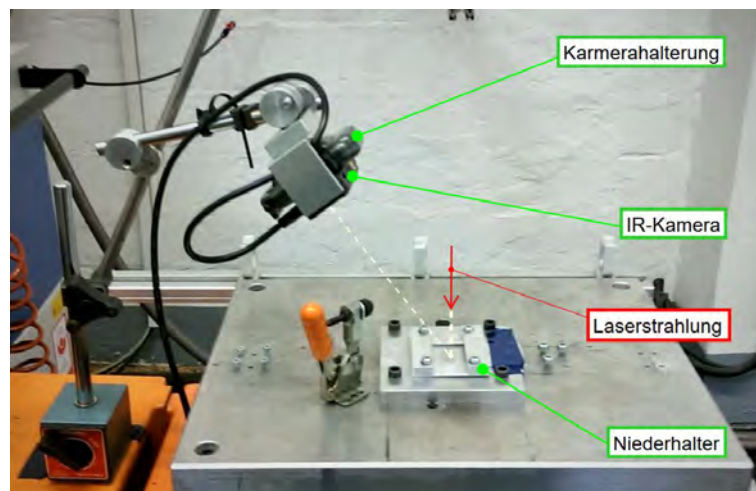


Abbildung 7.2: Darstellung der Installation der Wärmebildkamera (FLIR), die für die Auswertung der abgegebenen Infrarotstrahlung der Verbindungszone verwendet wird

Die Vorrichtung wurde dabei bewegungsneutral aufgestellt, sodass während des Bearbeitungsprozesses keine Positionsänderung auftritt. Durch den fixen Stand ist zum einen die Bewegungsunschärfe minimal und zum anderen die aufgenommenen Wärmebilder reproduzierbar zueinander. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Wärmebilder auf gleiche Weise verarbeitet werden können.

7.2.2 Messung mittels Thermoelement

Um Rückschluss auf die Grenzflächentemperatur zwischen der Titan-PET-G - Verbindung zu bekommen, wurde mit Thermoelementen gemessen. Diese wurden so positioniert, dass die Temperatur möglichst nahe an der Grenzfläche gemessen wird. Dabei wurden an drei Positionen kleine Löcher in die 2 mm starke Titanprobe gebohrt, die eine Bohrungstiefe von 1,5 mm aufwiesen.

Darin wurde das Thermoelement mit einem wärmeleitenden Hochtemperaturkleber verklebt, um einen sicheren Halt zu gewährleisten. In Abbildung 7.3 ist die Position der Thermoelemente grafisch dargestellt.

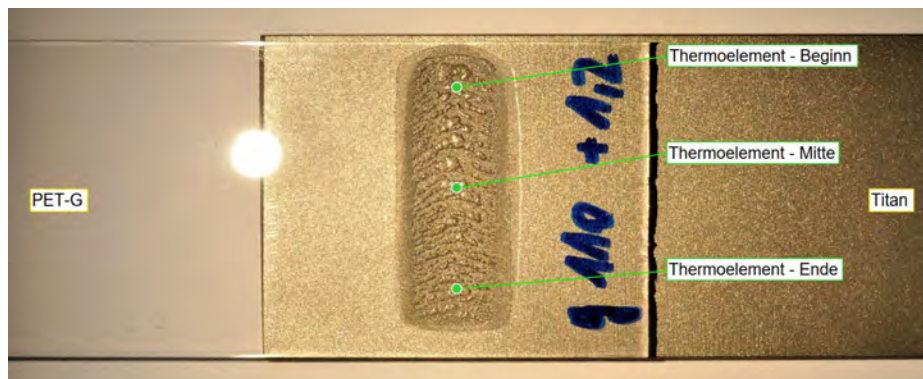


Abbildung 7.3: Kenntlichmachung der verschiedenen Messpositionen der Thermoelemente anhand einer Verbindungsnaht

Für die Einbindung der Thermoelemente wurde ein Versuchsaufbau verwendet, der das Spannungssignal für weite Strecken übertragen kann. Da es sich hier um sehr kleine Spannungen handelt, würden schon kleine Verlustgrößen zu falschen Ergebnissen führen. Deshalb wurde das Ausgangssignal der Thermoelemente direkt in eine Verstärkerschaltung geleitet, welche durch eine externe Spannungsversorgung gespeist wird. Durch einen Umwandlungsprozess entsteht eine Spannung, die durch BNC-Koaxialkabel über weite Strecken übertragen werden kann. Für die Ausgangsspannung aus der Verstärkerschaltung gilt die Skalierung,

$$1\text{ }^{\circ}\text{C} \cong 10\text{ mV} \quad (7.1)$$

die dann durch Signaleingänge am PC verarbeitet werden kann. Aufgrund dieser Skalierung kann beim Ablesen des Spannungssignals gleich die vorliegende Temperatur ermittelt werden. Zum Beispiel entsprechen 100 °C einem Volt an Spannung.

8 Probenherstellung

Für die Herstellung der Proben wurde das LAMP-Verfahren angewendet. Bei diesem Verbindungsprozess steht die Abkürzung für *Lasergestütztes Verbinden von Metall und Kunststoff*.

8.1 Grundprinzip

Mithilfe dieser Verbindungstechnik werden verschiedene Materialien, im speziellen Metall-Kunststoff-Paarungen, miteinander verbunden. Dabei werden die Werkstoffe überlappend angeordnet und die dabei entstehende Grenzfläche durch einen Laser erwärmt. Es kommt zu einer belastbaren Verbindung zwischen den Materialien.

8.2 Praktische Anwendung

Die Eigenschaften der Materialien bestimmen die praktische Anwendung des Verfahrens. Ist der Kunststoff für die Wellenlänge der eingebrachten Laserstrahlung transparent, sprich wenig Energie wird beim Durchstrahlen absorbiert, kann man sich diese Eigenschaft des Kunststoffes zu Nutze machen und durch den Kunststoff bestrahlen. Für diesen Fall wird der Kunststoff indirekt durch die abgegebene Wärmeenergie des Metalls erwärmt. Das Prinzip ist in Abbildung 8.1 schematisch dargestellt.

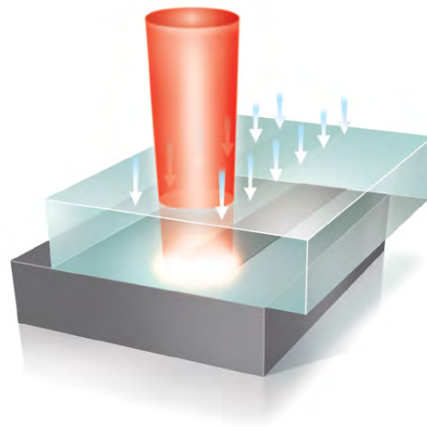


Abbildung 8.1: Schematische Darstellung - LAMP-Verfahren - transparenter Kunststoff [14]

Im Allgemeinen kann man sagen, dass Kunststoffe mit einer Transparenz größer als 70 % direkt der Laserstrahlung ausgesetzt werden können (Kunststoff oben angeordnet) [19, S. 129].

Ist der Kunststoff für die eingebrachte Laserstrahlung nicht transparent bzw. der Transmissionsgrad zu gering (z.B. kohlefaserverstärkter Kunststoff CFK), kann auf der Seite des Metalls bestrahlt werden. Durch die Wärmeleitung des Metalls gelangt die Wärmeenergie durch das Material zur Grenzfläche, welche den Kunststoff ebenfalls erwärmt.

8.2.1 Mechanismus der Blasenbildung

Frühere Untersuchungen aus [19] haben gezeigt, dass die Verbindung an Festigkeit gewinnt, wenn sich im Kunststoff kleine und fein verteilte Blasen beim Verbindungsprozess ausbilden. Diese Blasen sind durch die thermischen Zersetzungerscheinungen des Kunststoffes zu erklären. Die Bildung der Blasen kann durch die zugeführte Energiemenge an der Grenzfläche beeinflusst werden. Je höher die Strahlungsintensität (Anstieg der Temperatur durch indirekten Wärmeübergang Metall - Kunststoff), desto größer die Abmessungen und die Anzahl der Blasen. Bei zu hoch gewählter Laserleistung kann es dazu führen, dass durch große Blasen bzw. sich ausbildenden Löchern die Festigkeit der Verbindung wieder abnimmt. Darum ist es wichtig, die optimale Leistung des Lasers zu wählen. In Abbildung 8.2 (A) sind die Blasen grafisch dargestellt.

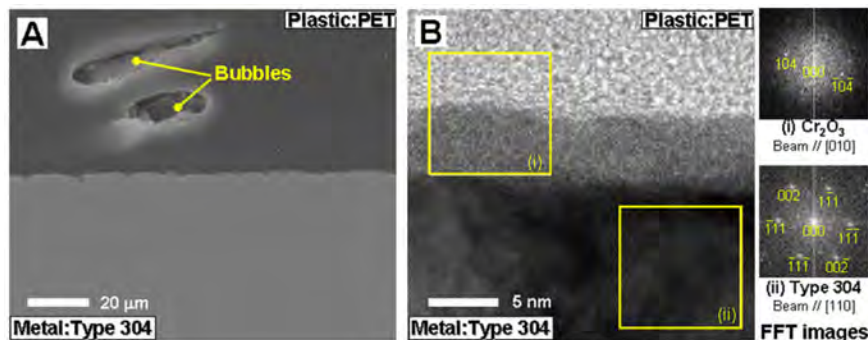


Abbildung 8.2: SEM Darstellung (A) - Darstellung der Blasen in der Kunststoffphase TEM Darstellung (B) - Zwischen Kunststoff und Metall ersichtlicher natürlicher Oxidfilm [20, S. 1248]

Des Weiteren haben Beobachtungen gezeigt, dass durch diese Bildung der Blasen ein hoher Gasdruck während des Verbindens induziert wird. Dadurch wird unter anderem auch der Fluss des geschmolzenen Kunststoffes beeinflusst, welcher in der Metalloberfläche vorliegende Poren oder etwaige Grübchen auffüllt. Sprich durch den Gasdruck

der Blasen werden Teile der aufgeschmolzenen Phase des Kunststoffes in die Metalloberfläche geschleudert. Außerdem entsteht ein natürlicher Oxidfilm (siehe auch Abbildung 8.2 (B)), bei dem die Materialien auf atomarer bzw. molekularer Ebene fest miteinander verbunden werden [19, S. 138]. Abbildung 8.2 dient hier nur als Prinzipdarstellung der Blasen und des Oxidfilms, da andere Werkstoffe verwendet wurden als in dieser Arbeit.

8.2.2 Umgebung

Um etwaige Reaktionen der Materialpartner mit der Umgebung zu minimieren, kann auch bei diesem Verfahren unter Schutzgasatmosphäre gearbeitet werden. Man sollte auch die Zersetzungstemperatur des Kunststoffes beachten, da diese viel niedriger als bei Metallen ist.

8.2.3 Vorteile

Die Vorteile dieses neuartigen Verfahrens liegen vor allem bei den kurzen Prozesszeiten und der flexibel gestaltbaren Größenabmessungen bzw. auch der geometrischen Form der Verbindung. Hohe Produktivität in automatisierten Abläufen stellt hier kein Problem dar, solange dies technisch umgesetzt werden kann.

Da es bei der Verbindung selbst zu einer molekularen Vernetzung und zu Diffusionsvorgängen an den beiden Materialien in der Grenzschicht kommt (Oxidfilm), ist auch die Langzeitstabilität gegeben. Welches Metall als Gegenstück verwendet wird, ist hinsichtlich des ablaufenden Verbindungsmechanismus von keiner großen Wichtigkeit. Bei der Anwendung des Verfahrens werden keine weiteren Elemente wie Schrauben oder diverse Kleinteile verwendet. Somit wird auch keine Zunahme des Gewichtes beobachtet.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist hierbei der Verzicht von adhäsiven Bindungen bzw. Klebstoffen. Dadurch können schädliche flüchtige Emissionen, die durch den Einsatz adhäsiver Stoffe in die Umgebung freigesetzt werden, vermieden werden [19, S. 131].

8.2.4 Nachteile

Da es sich bei dieser Verbindungstechnik um ein neuartiges Verfahren handelt, sind nur wenige Daten der verschiedenen Materialkombinationen bekannt. Des Weiteren ist dieses Verfahren auch nicht für alle Kunststoffe einsetzbar (z.B. Duroplast).

Für die optimale Verbindung ist eine Niederhaltekraft erforderlich, die die Entstehung eines Spalts zwischen den Materialien an der Grenzfläche möglichst minimiert bzw. im besten Fall verhindert. In Abbildung 8.1 ist dies durch Pfeile an der Oberfläche des Kunststoffes dargestellt.

8.3 Herstellung der Verbindung

In dieser Arbeit wird im speziellen eine Verbindung zwischen Titan (Ti) und Polyethylenterephthalat - Glykol (PET-G) hergestellt. Das Titan liegt dabei als Reintitan - Grade I vor. Das PET-G verhält sich transparent gegenüber der Laserstrahlung. Somit kann das unterhalb liegende Titan erwärmt und das PET-G indirekt erweicht werden.

Für die Herstellung der Verbindung wird der Abstand für die Bearbeitung zwischen Werkstück und Laser so eingestellt, dass sich der Brennpunkt des Diodenlasers genau in der Grenzfläche der beiden Materialien befindet $f_B = 0$ mm. In unserem Fall entspricht dieser Abstand genau 73 mm, gemessen von der unteren Fläche des Bearbeitungskopfes.

Der Laser bewegt sich mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 2 mm/s, wobei die Verbindungslänge mit 25 mm gewählt wurde. Der Startpunkt, an dem der Verbindungsprozess initiiert wird, liegt 5 mm von der Randzone des Titans entfernt. Für den Verbindungsprozess werden die beiden Platten so angeordnet, dass eine Überlappverbindung mit einer Überdeckung von 37 mm entsteht.

Für die Bestrahlung der Grenzfläche wurde durch die Verwendung einer Zylinderlinse eine Brennlinie erzeugt. Diese lässt eine breite Verbindungsnaht entstehen, ohne mehrmals bestrahlen zu müssen.

Beim Verbindungsprozess selbst fällt die Verbindungsbreite größer als die Breite des Strahlenprofils aus. Durch die Eigenschaft der Wärmeleitung des Materials wird die durch den Laserstrahl eingebrachte Wärme in die umliegende Zone des Materials abgegeben. Dort kommt es ebenfalls zu abgeschwächten Verbindungsmechanismen.

Man kann durchschnittlich mit einer Breite von 13 mm rechnen (Breite der Laserlinie 9,2 mm).

9 Verwendete Werkstoffe

Grundsätzlich können bei dieser Verbindungstechnologie eine Vielzahl von Werkstoffpaarungen verwendet werden. Sei es Titan, nichtrostender Stahl verbunden mit Kunststoffen wie PET, GFK, CFK, PP oder auch PA. Man muss jedoch beachten, dass die Wellenlänge der Laserstrahlung Einfluss auf das Absorptionsverhalten der Materialien hat.

Die Materialkombination Titan und PET wurde in [34] näher untersucht (Wellenlänge: 1070 nm, Zugfestigkeit: 2670 N), rostfreier Stahl *SUS304* in Kombination mit PET (Wellenlänge: 807 nm, Zugfestigkeit: 2950 N) in [21] und Baustahl *DC01* mit dem Verbindungspartner *PA6.6* bzw. *PA6* (Wellenlänge: 808 nm und 940 nm, Zugfestigkeit: 3300 N) in [3].

Auf die in dieser Arbeit verwendeten Werkstoffe, Titan und PET-G, wird in den folgenden Unterkapiteln etwas genauer eingegangen.

9.1 Titan

Titan zählt zur Gruppe der Leichtmetalle und ist darin das schwerste Element. Durch zulegen von verschiedenen Elementen entstehen unterschiedliche Eigenschaften, welche hohe Festigkeiten und des weiteren ein Verhältnis von Streckgrenze zu Dichte erreichen, das bislang von keinem metallischen Werkstoff nur annähernd erreicht wurde [22].

9.1.1 Eigenschaften

Titan lässt sich wegen seiner hohen Festigkeit nur schwer umformen und zerspanen. Insbesondere Kaltumformen ist aufgrund der Kristallstruktur nur in sehr engen Grenzen möglich.

Eine weitere wesentliche Eigenschaft von Titanlegierungen ist die gute Korrosionsbeständigkeit. Titan ist chemisch gesehen ein sehr unedles Metall, bildet aber eine gut schützende Passivschicht aus, die folglich zu hoher Korrosionsbeständigkeit führt [17]. Titanlegierungen sind bis zu Temperaturen von 550 °C beständig. Aufgrund der verstärkt einsetzenden Korrosion ab 550 °C, ist auch die maximale Einsatztemperatur auf diesen Bereich beschränkt.

Anwendung finden Titanlegierungen vor allem in den Bereichen:

- Luft- und Raumfahrt
- chemische Industrie
- Medizintechnik (Verträglichkeit)

- Energietechnik
- Sportgerätetechnik

9.1.2 Konfigurationen

Titan tritt in verschiedenen Gittermodifikationen auf, von denen jede nur in einem bestimmten Temperaturbereich stabil ist. Man unterscheidet unter anderem zwischen:

- hexagonal dichteste Kugelpackung (hdp): α -Titan
- kubisch raumzentrierte Kugelpackung (krz): β -Titan

Die Umwandlung der α - in die β - Phase erfolgt oberhalb der sogenannten Transustemperatur von 882 °C. Die Existenz dieser zwei Phasen und die damit verbundene Gefügeumwandlung ist Voraussetzung für die vielfältigen Eigenschaften [22, S. 326]. Bei tieferen Temperaturen liegt Reintitan in der Modifikation einer hexagonal dichtesten Kugelpackung (hdp) vor, die mit α -Titan bezeichnet wird.

Reintitan ist einphasig und gehört zur Gruppe der α -Legierungen. Diese weist, verglichen mit den anderen Titanlegierungen, eine relativ niedrige Festigkeit von $Rm = 280 - 740 \text{ N/mm}^2$ auf. Die Reintitanlegierungen enthalten bis zu 0,40 % Sauerstoff. Der Sauerstoff ist dafür verantwortlich, dass die Streckgrenze drastisch erhöht wird.

9.1.3 Zerspanung

Die Zerspanung von Titanlegierungen gilt aufgrund ihrer mechanischen und physikalischen Eigenschaften als schwierig. Die mechanische Festigkeit ist hoch, die Bruchdehnung im Gegensatz dazu gering. Der Elastizitätsmodul ist fast um die Hälfte niedriger als bei Stahl. Im Allgemeinen wird dieser mit rund 110 kN/mm^2 angegeben.

Die hexagonale α -Phase ist relativ spröde, schlecht verformbar und neigt stark zur Kaltverfestigung. Diese Phase wirkt auf die Werkzeugschneide stark verschleißfördernd. Zusätzlich haben Titanlegierungen eine geringe Wärmeleitung, ungefähr 10 - 20 % der von Stahl. Als Folge wird nur ein geringer Teil der Wärme über den Span abgeleitet, was guter Kühlung beim Zerspanen bedarf [22].

9.1.4 Absorption

Bei der Bearbeitung mit Laserstrahlung hängt das Bearbeitungsergebnis wesentlich von der pro Zeiteinheit absorbierten Energie ab. Ein Maß für die zur Verfügung stehende Leistung ist der Absorptionsgrad A , ein Verhältnis zwischen der eingekoppelten Leistung zu der auf das Werkstück auftreffenden Leistung.

Metalle besitzen eine relativ geringe Absorption für elektromagnetische Strahlung im sichtbaren und infraroten Wellenlängenbereich. Die absorbierte Strahlungsenergie wird im Werkstück allgemein in Wärme umgewandelt. Die Absorption ist eine globale Größe, welche keine Auskunft darüber gibt, wo die Strahlungsenergie deponiert bzw. in Wärme umgewandelt wird. Man kann jedoch sagen, dass bei Metallen der

Prozess der Absorption immer in einer dünnen, oberflächennahen Schicht stattfindet [29]. Dies wird allgemein durch das Lambert-Beer'sche Gesetz beschrieben. Dieses Gesetz definiert das Absorptionsverhalten elektromagnetischer Strahlung in Materie. Die Strahlungsintensität nimmt mit zunehmender Eindringtiefe exponentiell ab. Ursache für die Abnahme ist dabei der Imaginärteil des komplexen Brechungsindex n_k [28]. Mit dem Begriff Extinktionskoeffizient k wird der Imaginärteil des komplexen Brechungsindex n_k beschrieben. Er ist eine dimensionslose Größe und im allgemeinen von der Wellenlänge abhängig. Je größer der Wert, desto stärker die Absorption der elektromagnetischen Strahlung im Medium.

Der Absorptionsindex κ ist mit dem Extinktionskoeffizient k und der Brechzahl n verknüpft. Es gilt,

$$\kappa = \frac{k}{n}. \quad (9.1)$$

Durch die Brechzahl n (Realteil der komplexen Brechzahl, siehe 5.4.3) und den Absorptionsindex κ kann der Absorptionsgrad A , der von der Wellenlänge λ abhängig ist, berechnet werden [5],[29]. Der spektrale Absorptionsgrad $A(\lambda)$ ist bei senkrechtem Einfall der Strahlung zur Oberfläche definiert durch:

$$A(\lambda) = 1 - \frac{(n - 1)^2 + \kappa^2}{(n + 1)^2 + \kappa^2} \quad (9.2)$$

In Abbildung 9.1 ist das Absorptionsverhalten verschiedener Werkstoffe über die Wellenlänge grafisch dargestellt. Es sind auch verschiedene Lasertypen eingetragen, um einen Vergleich hinsichtlich des Absorptionsverhaltens zu bekommen.

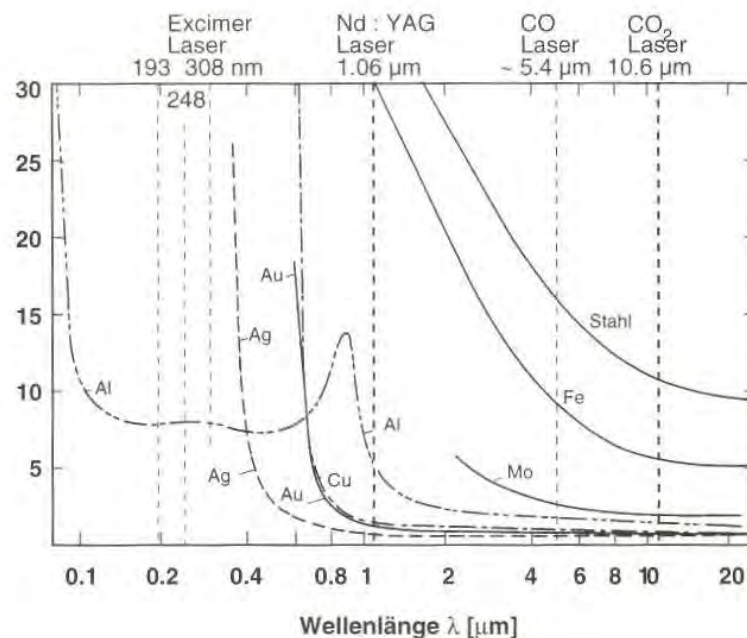


Abbildung 9.1: Darstellung des Absorptionsgrades verschiedener Werkstoffe in % in Abhängigkeit der Wellenlänge [8]

Die Berechnung der Absorption für Werkstoffe, die in der Praxis eingesetzt werden, ist in der Regel nur näherungsweise möglich. In der Praxis ist der genaue Wert der Absorption deshalb nur durch Messungen zu bestimmen.

a) Messung

Die Absorption kann direkt durch Messung der einfallenden Laserenergie oberhalb des Werkstücks und eine Temperaturmessung bei bekannter Wärmekapazität des Werkstücks ermittelt werden. Auch durch Messung der reflektierten Laserstrahlung kann näherungsweise auf die Absorption rückgerechnet werden. Im Idealfall verhält sich die Reflexion R umgekehrt zur Absorption A . Daraus folgt, dass wenn im Idealfall die gesamte ins Werkstück eindringende Strahlung absorbiert wird,

$$R = 1 - A \quad (9.3)$$

gelten muss [29, S. 13].

Die Absorption A ist keine Materialkonstante, sondern hängt unter anderem bei gegebener Wellenlänge des Lasers ab von:

- den physikalischen Eigenschaften des Werkstoffs (Brechungsindex n , Absorptionsindex κ) und des Laserstrahls
- den Eigenschaften der Oberfläche (Rauigkeit, Morphologie, usw.)
- der chemischen Beschaffenheit der Oberfläche (Oxidschicht)
- der Temperatur, wobei die vorher erwähnten Parameter auch von der Temperatur abhängig sind
- den Veränderungen des Werkstoffs und der Umgebung (lokale Aufheizung bzw. Temperaturänderung, Phasenumwandlung, usw.)
- den Umgebungsbedingungen (Prozessgase, umgebende Materialien)

b) Temperaturabhängigkeit

Es wird im allgemeinen eine Zunahme der Absorption von Metallen beobachtet, wenn es zu einem Anstieg der Temperatur kommt. Der Verlauf ist in Abbildung 9.2 dargestellt.

Die Charakteristik des Kurvenverlaufes der beiden Materialien (Abb. 9.2) zeigt einen Anstieg der Absorption bei Temperatursteigerung. Es ist auch bekannt, dass es bei steigender Temperaturen zu einer Zunahme des spezifisch elektrischen Widerstands kommt. Demnach sind ähnliche Verhaltensmuster zu erkennen, welche auf die gleiche physikalische Abhängigkeit für Temperatur hindeuten. Als Ursache wird die mit der Temperatur wachsende Elektronen-Gitter-Stoßfrequenz ν_m genannt, sprich die Veränderung der Gitterstruktur im Material.

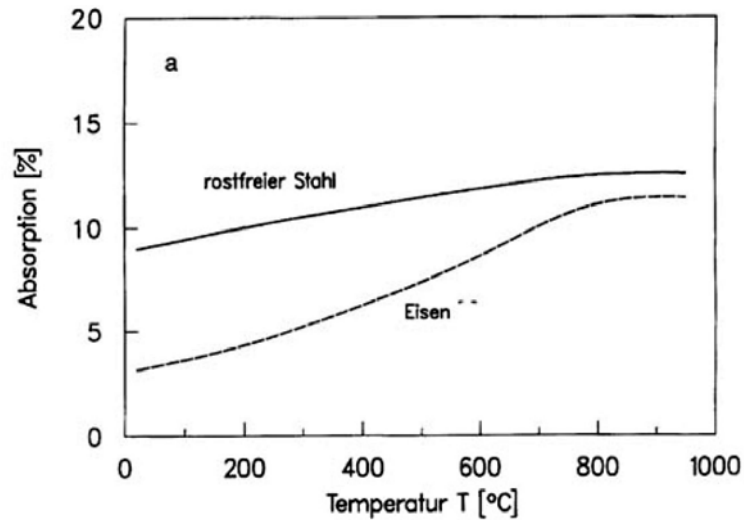


Abbildung 9.2: Darstellung der Absorption verschiedener Werkstoffe in Abhängigkeit der Temperatur [29, S.33]

c) Abhängigkeit der Oberflächenrauigkeit

Die Struktur der Oberfläche hat einen wesentlichen Einfluss auf die Absorption der Metalle. Im Allgemeinen kann man sagen, dass sich die Absorption mit steigender mittleren Rauigkeit der Oberfläche erhöht. In Abbildung 9.3 ist der Vergleich der Absorption bei unterschiedlichen Oberflächen des gleichen Werkstoffs dargestellt [29].

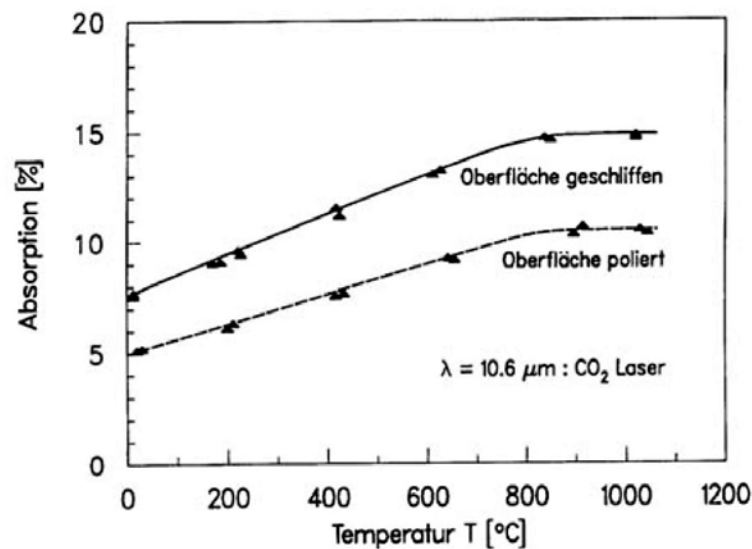


Abbildung 9.3: Darstellung der Absorption zweier Proben mit unterschiedlicher Oberfläche in Abhängigkeit von der Temperatur [29, S.36]

9.2 Polyethylenterephthalat-Glykol PET-G

PET-G zählt zu der Gruppe der amorphen Werkstoffe. Dieser Kunststoff entsteht durch Polymerisation von Monomeren, die während des Polymerisationsvorganges mit Glykol modifiziert werden. Die hohe optische Transparenz im sichtbaren Bereich und die optimierten Eigenschaften für 3D-Druckprozesse sind besondere Merkmale dieses Kunststoffes [33].

9.2.1 Allgemeines Verhalten

Das Verhalten der verschiedenen Kunststoffe hinsichtlich Temperatur und Belastung beeinflusst den praktischen Einsatz des Werkstoffes. Allgemein lässt sich sagen, dass die Verwendung unterhalb der Glasübergangstemperatur T_G stattfindet. In diesem Bereich sind Kunststoffe hartelastisch bzw. spröde und die Grundfestigkeit am größten. Beim sogenannten Glasübergang kommt es zu einem starken Abfall der mechanischen Eigenschaften.

Bei Überschreitung des Glasübergangs, sprich oberhalb der Glasübergangstemperatur T_G , nehmen die mechanischen Festigkeitseigenschaften sehr stark ab und das Material geht in den weichen gummielastischen Bereich über [30].

Ist die Erweichungstemperatur T_E erreicht, so können die Kunststoffe gießtechnisch verarbeitet werden. Ab dieser Temperatur geht man in den thermoplastischen Bereich über. Die geometrische Form des vorliegenden Kunststoffes wird geändert.

Bei weiterer Erhöhung der Temperatur wird schlussendlich die Zersetzungstemperatur T_Z des Kunststoffes erreicht. Da eine Verdampfung von Makromolekülen nicht möglich ist, werden bei Überschreitung der Zersetzungstemperatur die Moleküle zerstört. Diese Temperatur stellt die absolute Grenze für den Gebrauch von Kunststoffen dar. Besonders bei der Verarbeitung von Kunststoffen wie Schweißen, Spritzgießen oder Extrusion ist diese Temperatur zu beachten [1]. In Abbildung 9.4 ist das Verhalten amorpher Thermoplaste bei Wärmeeinwirkung grafisch dargestellt.

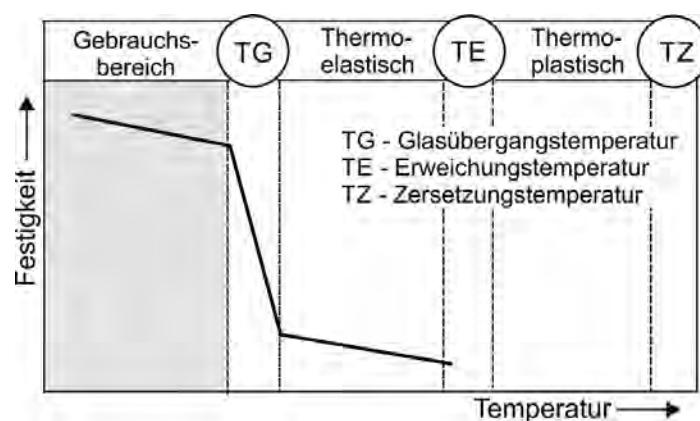


Abbildung 9.4: Darstellung des Festigkeitsverhaltens amorpher Thermoplaste bei Temperatureinwirkung [1, S. 230]

9.2.2 Eigenschaften

Der in unserer Arbeit verwendete Kunststoff hat laut Datenblatt (siehe auch Kapitel im Anhang) eine Zersetzungstemperatur von $>280\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die maximale Betriebstemperatur liegt bei $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, sprich der Kunststoff ist bis zu dieser Temperaturbelastung Formstabil. Die max. Betriebstemperatur ist eine Temperatur vor dem Glasübergang (Gebrauchsbereich). Die optimale Temperatur für die Plattenverformung liegt bei $120 - 160\text{ }^{\circ}\text{C}$, d.h. zwischen der Glasübergangstemperatur und der Schmelztemperatur (thermoelastischer Bereich, siehe auch Abb. 9.4). Die Schmelztemperatur liegt im Bereich von $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ [33].

Die Kennwerte des Kunststoffes sind im technischen Datenblatt in Kapitel 12.2 des Anhangs aufgelistet.

10 Vorgehensweise

Um die Versuchsreihen durchzuführen, muss vorerst der Bearbeitungskopf für den Diodenlaser in Betrieb genommen und auf seine korrekte Funktion überprüft werden. Danach können Verbindungsnahte erzeugt und die sich daraus ergebende Zugfestigkeit bestimmt werden. Durch die Variation der einzelnen Parameter wie Laserleistung und Oberflächenrauigkeit, kann der Bestfall evaluiert werden, bei dem die Festigkeit der Verbindung ihr Maximum aufweist.

Danach wird mit Hilfe von Temperaturmessungen der Verbindungsprozess beschrieben und versucht, Bereiche zu definieren, bei denen optimale Eigenschaften hinsichtlich der Festigkeit eintreten.

Für die Darstellung der Messwerte in den Diagrammen werden die Messpunkte aufgrund der besseren Kenntlichmachung miteinander verbunden und als Linie dargestellt.

10.1 Inbetriebnahme des Bearbeitungskopfes

Beim Bearbeitungskopf (Aufbau siehe [31]) handelt es sich um eine Neukonstruktion, wo einerseits die Bauteile andererseits auch die eingebauten Linsen Toleranzen durch den Fertigungsprozess aufweisen. Diese Abweichungen machen sich vor allem durch eine Änderung der Brennweite der Linsen bemerkbar. Durch die Herstellertoleranz der Linsen kommt es alleine schon zu einer Abweichung von ca. einem Prozent, in die positive als auch negative Richtung der optischen Achse, wo der tatsächliche Brennpunkt der Linse liegen kann. Das wäre bei einer Brennweite von 150 mm, $\pm 1,5$ mm an Verschiebung des Brennpunktes. Deshalb ist es wichtig, vor der Inbetriebnahme die Funktionsweise zu kontrollieren.

Für die korrekte Funktion des Laserbearbeitungskopfes muss nach der Zerstreuungslinse ein parallel zur optischen Achse verlaufender Strahlengang entstehen, um mit dem theoretisch überlegten Konzept übereinzustimmen (siehe auch [31]). Durch die Positionierung der Faser kann der Objektabstand verändert und somit der Eintritt von Strahlung in das optische System variiert werden.

10.1.1 Einstellen des Objektabstandes

Der Objektabstand ist definiert durch den Abstand zwischen dem Faserende (Austritt der Laserstrahlung) und der planen Fläche der ersten plankonvexen Linse am Eintritt in das Linsensystem.

Dabei ist es von großer Wichtigkeit, den Objektabstand so einzustellen, dass dieser der Brennweite der Linse entspricht. Dann tritt nach der im Linsensystem eingesetzten Zerstreulinse ein parallel zur optischen Achse liegender Strahl aus. In Abbildung 10.1 ist dies grafisch dargestellt. Dabei entspricht der *Abstand X*, dem gemessenen Abstand (bestimmt mittels Tiefenmaß) für die weiteren Versuche.

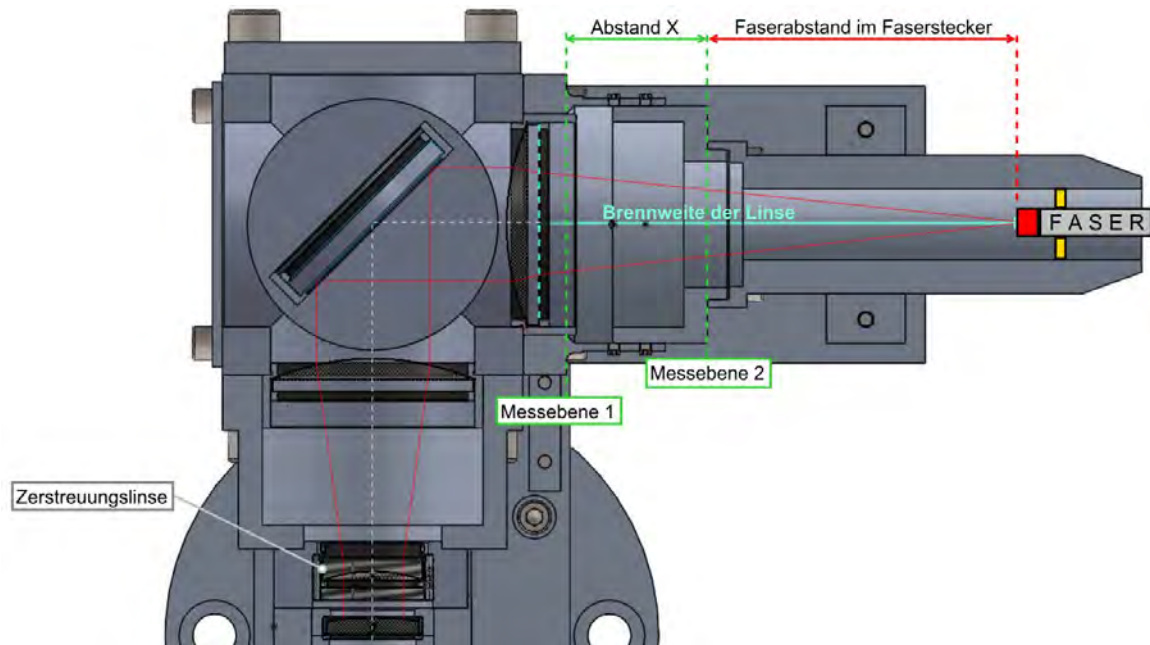


Abbildung 10.1: Grafische Darstellung des gemessenen Abstands für die Kollimation
 - Schematische Darstellung des Strahlenganges im Bearbeitungskopf

Für die experimentelle Bestimmung wird die Fokussierlinse entnommen, sodass die Zerstreulinse die letzte Linse im System darstellt.

Beim Versuchsablauf wird für die Ermittlung des Strahlendurchmessers ein thermosensitives Papier verwendet, welches direkt mit der Strahlung in Wechselwirkung gebracht wird. Dadurch entsteht eine Verfärbung (Brennfleck), welche Rückschluss auf den Strahlendurchmesser liefert. Bei optimaler Einstellung sollte es bei einer vertikalen Verschiebung des Bearbeitungskopfes relativ zur Bearbeitungsfläche (Offset), zu keiner Vergrößerung bzw. Verkleinerung des Brennflecks kommen. In der nächsten Abbildung sind die Verfärbungen für drei Fälle grafisch dargestellt. Die Abkürzung *BP* steht für den theoretisch berechneten Brennpunkt.

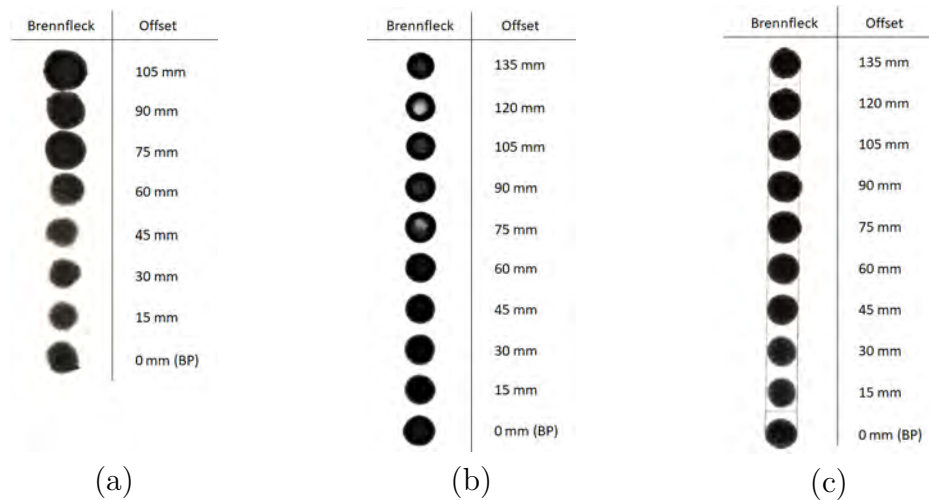


Abbildung 10.2: Darstellung der verschiedenen Brennflecke als Verfärbung am thermosensitiven Papier mit jeweils 70 Watt und 5 Sekunden Bestrahlungsdauer: (a) 30 mm - Abstand X, (b) 40 mm - Abstand X, (c) 36 mm - Abstand X = gewählte Einstellung

Diskussion

In Abbildung 10.2-(a) kann man erkennen, dass es bei der Einstellung von 30 mm (Abstand X) zu einer starken Aufweitung des Strahls nach der Zerstreungslinse kommt. Eine Besserung kann durch die Vergrößerung dieses Abstandes erzielt werden. In Abbildung 10.2-(b) ist eine leichte Abnahme im Strahlendurchmesser zu erkennen, was folglich eine Verkleinerung des Abstandes bedeutet. Die optimale Einstellung wird bei einem Abstand von 36 mm aufgezeichnet (siehe Abbildung 10.2-(c)). In diesem Fall sieht man, dass die Änderung des Durchmessers des Strahls über die Offset-Einstellung annähernd konstant bleibt. Der Abstand X von 36 mm wird für die weiteren Versuche verwendet.

Durch die geometrischen Abmessungen der Bauteile und den Einbauverhältnissen der plankonvexen Linse ist nun eine Bestimmung des Faserabstandes im Faserstecker $LLK - B$ möglich. Bei gegebener Rückbrennweite der plankonvexen Linse von $b_f = 119,2 \text{ mm}$ entspricht dieser 76,2 mm.

10.1.2 Nachjustierung des Tool-Center-Point TCP

Durch die Veränderung des Objektabstandes kommt es automatisch zu einer Änderung der Brennweite für die Fokussierung am Werkstück. Deshalb muss die Lage des Brennflecks kontrolliert und der TCP nachjustiert werden.

Der TCP ist definiert als Referenzpunkt am Werkzeug, der beliebig gewählt werden kann. Meist erleichtert dieser die Programmierung des Programmcodes, über welchen die Positionierung des Werkzeuges definiert wird. Beispiel hierfür ist eine Schweiß-

zange, wo die Elektrode als TCP gewählt wird. In unserem Fall ist der TCP der Brennpunkt der Fokussieroptik des Laserbearbeitungskopfes.

Folgt man hier der Theorie, sollte der Brennpunkt mit dem theoretisch berechneten Abstand übereinstimmen, da vor der finalen Fokussierung, ein paralleler Strahl durch die Zerstreuungslinse vorliegt.

Auch hier werden Versuche am thermosensitiven Papier durchgeführt, die Rückschlüsse zum kleinsten entstehenden Brennpunkt liefern sollen. Dabei wird der Abstand des Bearbeitungskopfes relativ zur Bearbeitungsebene in vertikaler Richtung stückweise variiert. Der Abstand ist von der unteren Ebene des Bearbeitungskopfes zur bearbeitenden Fläche gemessen. In den nächsten Abbildungen sind die einzelnen Ergebnisse grafisch aufbereitet.

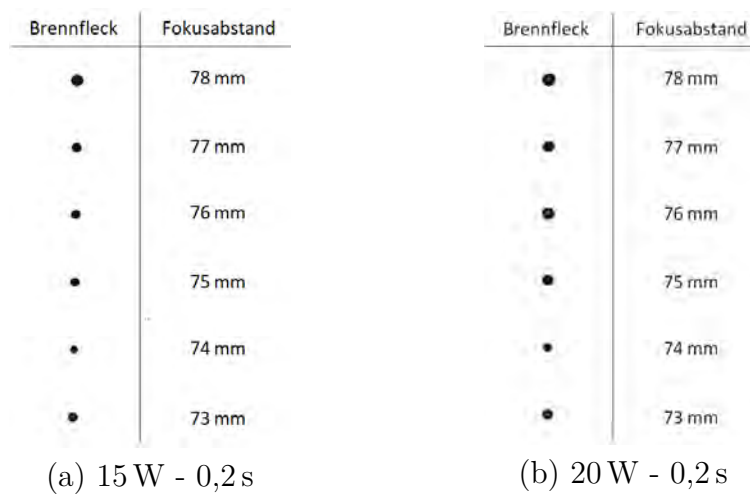


Abbildung 10.3: Darstellung der verschiedenen Brennpunkte bei unterschiedlichen Bearbeitungsabständen: Abstandsänderung 1 mm

In Abbildung 10.3 ist ersichtlich, dass der Fokuspunkt zwischen 73 mm und 75 mm liegen muss. Aufgrund dieser Erkenntnis wurde eine kleinere Abstufung zwischen den Punkten gewählt, um genauere Aussagen hinsichtlich der Änderung des optimalen Fokuspunktes treffen zu können (siehe Abbildung 10.4).

Brennfleck	Fokusabstand	Brennfleck	Fokusabstand
•	75,0 mm	•	75,0 mm
•	74,8 mm	•	74,8 mm
•	74,6 mm	•	74,6 mm
•	74,4 mm	•	74,4 mm
•	74,2 mm	•	74,2 mm
•	74,0 mm	•	74,0 mm
•	73,8 mm	•	73,8 mm
•	73,6 mm	•	73,6 mm
•	73,4 mm	•	73,4 mm
•	73,2 mm	•	73,2 mm
•	73,0 mm	•	73,0 mm

(a) 15 W - 0,2 s (b) 20 W - 0,2 s

Abbildung 10.4: Darstellung der verschiedenen Brennpunkte im Bereich 73 - 75 mm: Abstandsänderung 0,2 mm

Diskussion

Laut den Abbildungen 10.4-(a) und 10.4-(b) lässt sich für den Bereich zwischen 73 und 75 mm sagen, dass unterschiedliche Ergebnisse für die Lage des kleinsten Brennflecks vorliegen. Der Brennfleck für die Versuchsreihe von 15 W ist bei 73 mm und für 20 W bei 73,2 mm am kleinsten, jedoch kann die minimale Differenz zwischen den beiden Punkten auf Messungenauigkeiten zurückzuführen sein.

Abgesehen von der Abweichung durch den vorherigen Vergleich müsste das Minimum des Brennfleckdurchmessers (laut Abbildung 10.3), im Bereich um 74 mm liegen.

Dies deutet darauf hin, dass bei den gering verwendeten Laserleistungen (ca. 7% der Maximalleistung) keine eindeutige Bestimmung hinsichtlich der Lage des aktuellen Brennpunktes möglich ist. Trotz einiger Durchläufe wurde keine Verbesserung für dieses Problem beobachtet.

Vorerst kommt es zu keiner Nachjustierung des TCP's. Der Abstand zwischen Brennpunkt und der untere Ebene des Bearbeitungskopfes wurde mit 73 mm belassen.

10.1.3 Vermessung der Leistung am Austritt des Laserkopfes

Für die Leistungsmessung kamen verschiedene Messgeräte zur Anwendung. Die gemessenen Werte wurden in tabellarischer Form aufgelistet bzw. die sich daraus ergebenden Messkurven in Diagrammen visualisiert. Diese sind jeweils für die verschiedenen Geräte in den vorhergesehenen Unterpunkten ersichtlich.

Bei den Leistungsmessgeräten wird die Leistung des Laserstrahls auf unterschiedliche Art und Weise gemessen. Einerseits handelt es sich um Leistungsmessgeräte, die mit einer vorgegebenen Zeitkonstante für die Bestrahlungsdauer arbeiten. Die dadurch entstehende Differenztemperatur vor und nach der Messung dient der Berechnung der Leistung. Andererseits gibt es auch Leistungsmessgeräte, die nicht mit der Temperaturdifferenz sondern mit der zeitliche Änderung der Wärmeenergie arbeiten, sprich keine Zeitkonstante muss eingehalten werden. Diese werden dann als kontinuierliche Leistungsmessgeräte bezeichnet.

Die eingezeichnete Gerade in den Diagrammen entspricht jener Leistung, die durch den vorher genutzten Bearbeitungskopf generiert wurde.

a) Optical Engineering: Modell 25B, 0 - 100 W

Bei diesem Leistungsmesser wird mit einer Zeitkonstante von 20 Sekunden gearbeitet. Die Leistung kann nach Ablauf dieser Zeit direkt von der analogen Anzeige abgelesen werden. Der Messungen werden zwischen 10 W und 90 W aufgenommen.

Gemessene Leistungswerte Modell 25B - 0 bis 100 W	
Eingestellte Leistung	Messwerte
10 W	8,5 W
20 W	19,0 W
30 W	30,5 W
40 W	42,0 W
50 W	56,0 W
60 W	66,5 W
70 W	78,0 W
80 W	88,0 W
90 W	98,0 W

Tabelle 10.1: Gemessene Leistungswerte: 10 W - 90 W, Modell 25B

Die Messkurve wird in Abbildung 10.5 dargestellt.

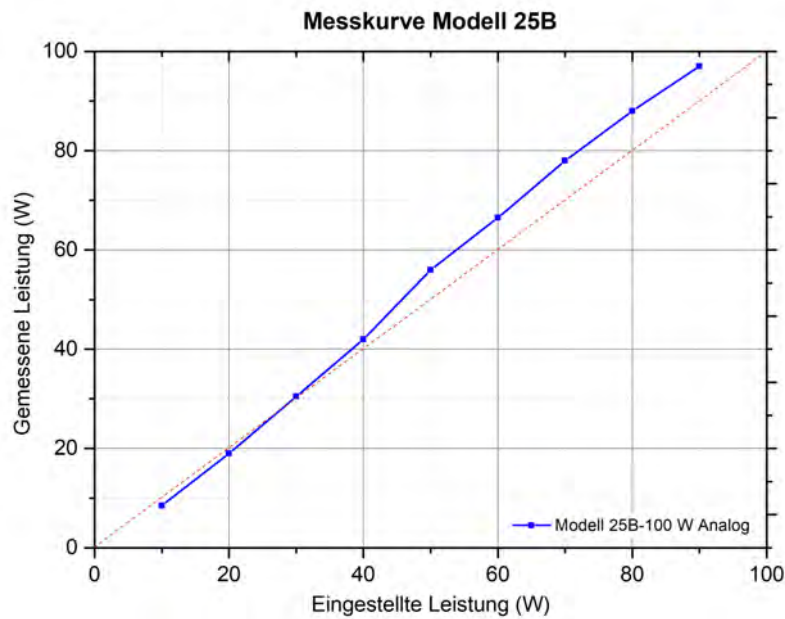


Abbildung 10.5: Messkurve der ermittelten Leistung: Modell 25B - 100 W

In Abbildung 10.5 kann man erkennen, dass die gemessene Leistung erst ab ungefähr 25 W über der eingestellten Leistung liegt. Des weiteren ist am Beginn des Verlaufes ein linearer Anstieg zu erkennen, der dann zum Ende hin abnimmt. Im Großen und Ganzen kann man sagen, dass mehr Leistung am Messgerät ankommt als an der Steuerung für die Laserleistung eingestellt wird.

b) Coherent: Modell 150-50 C, 300 mW - 150 W

Dieses Messgerät zeigt die Leistung kontinuierlich über ein digitales Display an, wobei eine ausreichende Genauigkeit zwischen 2,9 - 11,9 Sekunden Belichtungsdauer angegeben wird. Die aufgelisteten Messwerte werden bei einer Belichtungsdauer von 7 Sekunden durchgeführt. Der Messungen werden zwischen 10 W und 130 W aufgenommen und in Tabelle 10.2 aufgelistet:

Gemessene Leistungswerte Modell 150-50C - 0 bis 150 W

Eingestellte Leistung	Messwerte
10 W	10,5 W
20 W	21,8 W
30 W	33,0 W
40 W	43,8 W
50 W	54,7 W
60 W	66,7 W
70 W	76,9 W
80 W	87,6 W
90 W	98,5 W
100 W	110,0 W
110 W	120,0 W
120 W	132,0 W
130 W	145,0 W

Tabelle 10.2: Gemessene Leistungswerte: 10 W - 130 W, Modell 150-50C

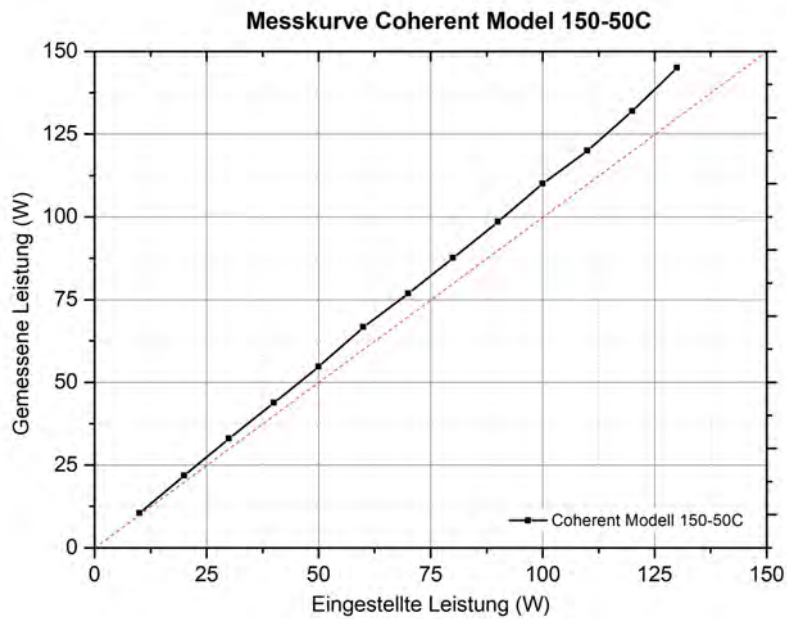


Abbildung 10.6: Messkurve der ermittelten Leistung: Modell 150-50C - 150 W

Abbildung 10.6 zeigt einen linearen Verlauf der Messwerte mit konstanter Steigung. Weiters kann man feststellen, dass die gemessene Leistung immer höher als die eingestellte Leistung an der Lasersteuerung ist.

c) Vergleich der beiden Messkurven

Der Vergleich der beiden Messkurven ist in Abbildung 10.7 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass beide Messgeräte annähernd den gleichen Verlauf der Leistung anzeigen. Dies lässt darauf schließen, dass die Ergebnisse beider Messgeräte plausibel erscheinen. Größere Abweichungen sind bei der Messkurve des analogen Leistungsmessers bei geringen Leistungswerten erkennbar, insbesondere bei Leistungen von 0 W - 25 W. Dies lässt darauf rückschließen, dass die Empfindlichkeit des Messgerätes erst bei höheren Leistungen ausreichend ist. Erklärbar würde dies durch den relativ geringen Wärmestrom sein, der nur zu einer geringen Temperaturerhöhung des Messkörpers innerhalb der Zeitkonstante führt. Abhilfe wäre ein Messgerät mit höherer Empfindlichkeit für niedrige messbare Leistungen (z.B. kleinerer Messkörper). Im Vergleich dazu ist das Messgerät von *Coherent* 150 – 50C die bessere Wahl, da auch kleine Leistungen bis 300 mW mit hoher Genauigkeit gemessen werden können.

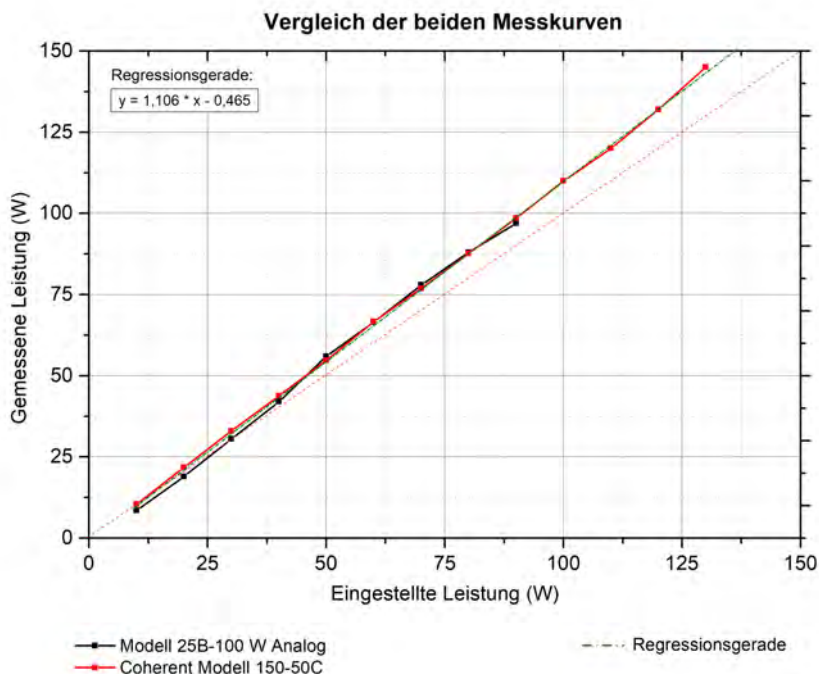


Abbildung 10.7: Vergleich der beiden Messkurven: Model 25B -100 W und Modell 150-50C - 150 W

Aufbauend auf den Messkurven der beiden Geräte wurde eine Regressionsgerade erstellt, die die tatsächliche Leistung in Abhängigkeit der eingestellten Leistungen beschreibt. Für den Bereich von 0 W - 130 W ist diese Gerade durch die ermittelten Messpunkte definiert. Da keine Möglichkeit besteht, höhere Leistungen zu messen, wird vorerst für Leistungswerte über 130 W interpoliert. Somit wird diese Gerade auch außerhalb dieses Bereiches verwendet.

Die Ausgangsleistung des neu entwickelten Bearbeitungskopfes ist im Vergleich zum vorher verwendeten Bearbeitungskopf um ca. 11 % gestiegen. Diese Effizienzsteigerung wurde durch die für diese Laserstrahlung (976 nm) zugeschnittene Transformationsoptik (geeignete Linsenwerkstoffe und Zusammenspiel der verschiedenen Linsenbrennweiten) erreicht.

Die mathematische Beschreibung der Bestimmungsgleichung dieser vermessenen Leistungsgeraden lautet:

$$y = 1,106 \cdot x - 0,465 \quad (10.1)$$

Für die weiteren Experimente wurde die Ausgangsleistung des Lasers entsprechend der Bestimmungsgleichung 10.1 angepasst.

10.2 Einfluss der Oberfläche

Um die Auswirkung der Oberflächenrauigkeit des Titans auf die mechanische Ausbildung der Festigkeitskennwerte der Verbindung zu untersuchen, wurden für die experimentelle Bestimmung Vorversuche mit unterschiedlichen Oberflächenrauigkeitswerten durchgeführt. Diese Vorversuche dienten einer groben Abschätzung des Leistungsbereichs und der Bestimmung des allgemeinen Festigkeitsverhalten der Verbindung für weitere Untersuchungen. Dabei wurde mit unterschiedlicher Laserleistung gearbeitet. Die Verbindungen wurden einer mechanischen Zugprüfung unterzogen, um die maximale Zugfestigkeit zu bestimmen. Daraus wurden Verläufe für die Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Laserleistung für die verschiedenen Oberflächenrauigkeiten ermittelt. Durch den Vergleich dieser Verläufe war es möglich, die Auswirkung des Mittenrauwertes R_a der Titanoberfläche auf die Festigkeitseigenschaft der Verbindungen zu beschreiben. Das Optimum wird jeweils durch die maximale Zugfestigkeit der Verbindungen definiert.

10.2.1 Oberflächenuntersuchung

Für die Charakterisierung der Oberfläche wurde der Mittenrauwert der Titanproben herangezogen. Dieser wurde mittels Reibprüfmessgerät *Mitutoyo Surf test* – 211 festgestellt. Dabei wurde der Mittelwert aus mehreren Messungen an den Probekörpern ermittelt und für die weitere Vorgehensweise dokumentiert.

a) geschliffene Oberfläche

Bei der Herstellung dieser Oberfläche wurde Schleifpapier mit einer Körnung von 80 verwendet. Es wurde versucht, möglichst in einer Richtung zu verfahren um eine gleichmäßige Struktur zu erzielen. In Abb. 10.8-(a) ist die Struktur des Gefüges dargestellt. Der ermittelte Mittenrauwert R_a beträgt $0,93\ \mu\text{m}$.

b) sandgestrahlte Oberfläche - Glasperlengranulat

Bei dieser Oberflächenbehandlung handelt es sich um ein Verfahren, bei dem eine gleichmäßig definierte Oberfläche entsteht. Durch die Größe der Glasperlen im Strahlmittel, kann auf die Feinheit der Oberflächenrauigkeit Einfluss genommen werden. In Abb. 10.8-(b) ist die Struktur des Gefüges dargestellt. Der Mittenrauwert wurde mit R_a von $1,48\ \mu\text{m}$ bestimmt.

Das kugelförmige Strahlmittel weist eine Körnung von $0,09 - 0,15\ \text{mm}$, die Härte $47\ HRC$ bzw. 6 (nach Mohs) und eine Dichte von $2,45\ \text{g/cm}^3$ auf. Die genauen Spezifikationen sind im Datenblatt im Kapitel 12.3 des Anhangs gelistet.

c) sandgestrahlte Oberfläche - Normalkorund

Die Oberfläche wird durch ein Strahlverfahren erzeugt. Der Unterschied zum vorher angewandten Verfahren ist das verwendete Granulat. Hier kommt Normalkorund in

Form von Aluminiumoxid zum Einsatz. Die Geometrie des Kornes ist scharfkantig und weist eine Korngröße von 0,25 - 0,5 mm auf. Die Härte ist mit 9 (nach Mohs) angegeben. In Abb. 10.8-(c) ist die Struktur des Gefüges dargestellt. Der Mittenrauwert wurde mit Ra von $4,02 \mu\text{m}$ gemessen. Das Datenblatt ist im Kapitel 12.3 des Anhanges gelistet.

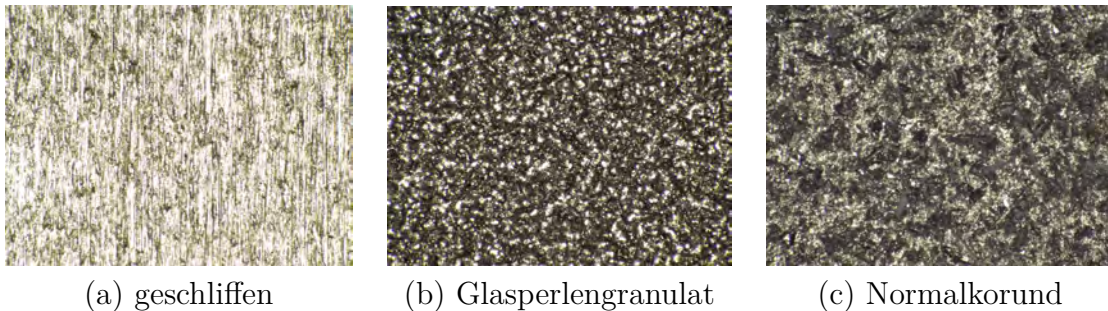


Abbildung 10.8: Aufnahmen der verschiedenen Oberflächenstrukturen unter dem Auflichtmikroskop bei 48-facher Vergrößerung - geschliffen (a) bzw. sandgestrahlt (b) und (c)

Alle Abbildungen der Oberflächenstruktur wurden bei 48-facher Vergrößerung unter dem Auflichtmikroskop aufgenommen.

Diskussion

Bei den in Abbildung 10.8 gezeigten Strukturen ist zu erkennen, dass Strahlen die beste Lösung ist, eine homogene bzw. gleichmäßige Struktur an der Oberfläche zu erzeugen. Das verwendete Normalkorundgranulat erzeugt keine so stark strukturierten kugeligen Eindrücke in der Oberfläche, wie das Glasperlengranulat. Grund dafür ist die geometrische Form als auch die Härte des Granulats. Im Falle der geschliffenen Probe ist die Schliffrichtung genau erkennbar.

Aus praktischer Sicht ist im Vergleich zum Handschliff, das Strahlen von Oberflächen die beste Option. Die einfache Handhabung und das Zeitmanagement waren beim Strahlen ein zusätzlicher Vorteil.

10.2.2 Zugversuche: Oberflächenuntersuchung

Mit den nun bekannten Mittenrauwerten der verschiedenen Oberflächentypen, konnten die Verbindungen hergestellt und durch Zugprüfung der Einfluss auf das mechanische Festigkeitsverhalten untersucht werden. Des weiteren wurden die Geometrieparameter wie z.B. Bläschenquerschnitt oder auch der mittlere Spannungsquerschnitt der Verbindungen (dort wo eine Verbindung zwischen den beiden Materialien eingegangen worden ist) grafisch ermittelt. Der Spannungsquerschnitt wurde für die Zugprüfung der verschiedenen Proben verwendet. Auch das Bruchverhalten der Verbindung nach dem Zugversuch war ein wesentliches Kriterium, welches dokumentiert wurde.

a) Verbindungsherstellung

Für jeden Oberflächentyp wurden jeweils fünf Verbindungen hergestellt, bei denen die Leistung aber nicht der Vorschub variiert wurde.

Das Leistungsintervall ist für die Herstellung der Verbindungsnahte wie folgt gewählt worden:

- geschliffen (o): 110 W - 190 W
- Glasperlengranulat (g): 90 W - 170 W
- Normalkorund (a): 50 W - 130 W

Das Intervall der Leistung bei den verschiedenen Oberflächentypen wurde so gewählt, dass ähnliche Ergebnisse beim Erreichen der Maximalleistung ersichtlich waren. Aufgrund der unterschiedlichen Leistungsbereiche lässt sich erahnen, dass die Absorptionsseigenschaften des Titans vom Rauigkeitswert abhängen.

In den Abbildungen 10.10, 10.11 und 10.12 sind die Verbindungen der verschiedenen Probestücke bildlich dargestellt.

Die Parameter, die durch bildliche Analyse mit *ImageJ* und mittels herkömmlichen Messmethoden erfasst wurden, werden gesammelt in den Tabellen 10.3 - 10.5 aufgelistet. SQ steht dabei für Spannungsquerschnitt, BQ für Bläschenquerschnitt, $\frac{BQ}{SQ}$ für die relative Bläschendichte im Querschnitt und $\varnothing B$ für den mittleren Blasendurchmesser (arithmetischer Mittelwert mehrerer Blasendurchmesser im BQ). Die Breite B der Verbindungsnaht wird über die gesamte Länge gemittelt.

In Abbildung 10.9 sind die in den Tabellen verwendeten Querschnitte bildlich dargestellt.

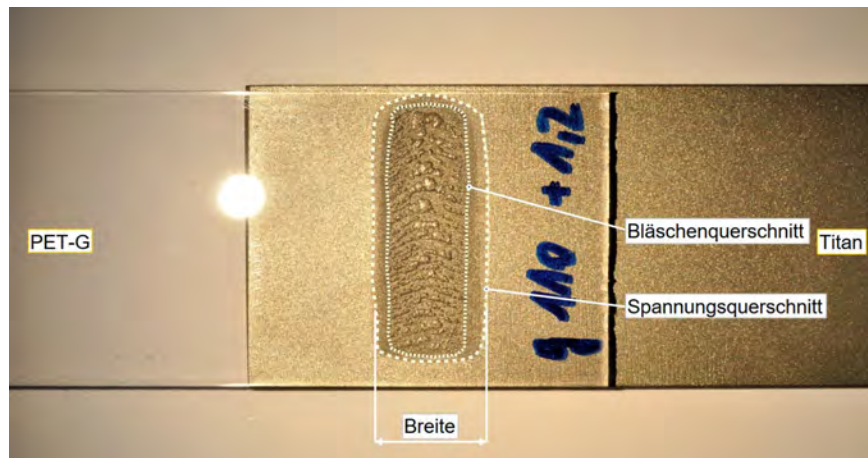


Abbildung 10.9: Darstellung einer Verbindung und die für die Berechnung verwendeten Querschnitte

Bei den Versuchen hat sich herausgestellt, dass auch der Querschnitt, wo keine Bläschen zu erkennen waren, zur Kraftübertragung der Verbindung beigetragen hat. Des-

halb wird dies bei der grafischen Ermittlung des Spannungsquerschnittes berücksichtigt.

- Titanproben mit geschliffener Oberfläche

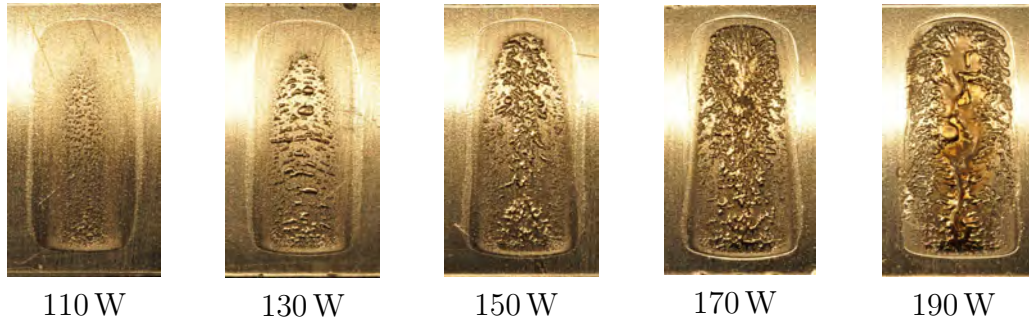


Abbildung 10.10: Grafische Darstellung der Verbindungsnahte aus den Vorversuchen: Leistungsbereich 110 W-190 W - geschliffene Oberfläche $R_a=0,93\ \mu\text{m}$

Gemessene Parameter der Verbindungen: geschliffen							
Probe	SQ	BQ	$\frac{BQ}{SQ}$	Breite	$\varnothing B$	Erhebung	Bruchbild
	mm^2	mm^2		mm	μm	mm	
o110-2	271,3	93,4	0,34	12,0	229,5	0,10	Nahtbruch
o130-2	273,0	148,4	0,54	11,9	760,1	0,18	Scherung
o150-2	317,5	211,0	0,66	12,8	451,1	0,20	Nahtbruch
o170-2	311,3	233,3	0,75	11,9	978,0	0,33	Scherung
o190-2	323,5	276,3	0,85	12,7	1802,8	0,31	Scherung

Tabelle 10.3: Gemessene Parameter der Verbindungen aus den Vorversuchen: 110 W-190 W, geschliffene Oberfläche

- Titanproben mit Glasperlen gestrahlte Oberfläche

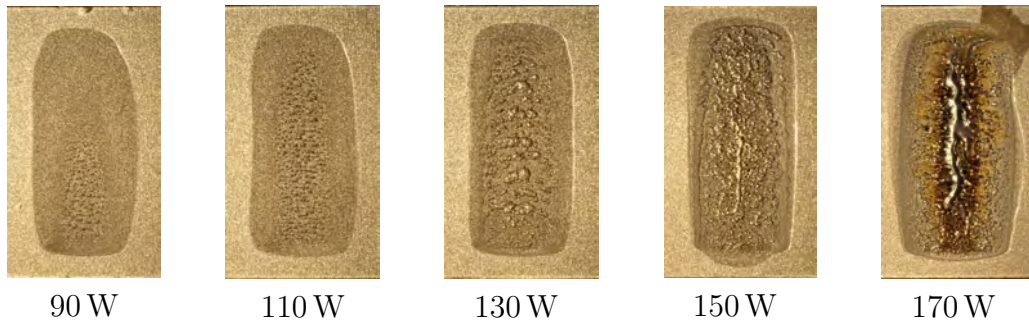


Abbildung 10.11: Grafische Darstellung der Verbindungsnahte aus den Vorversuchen: Leistungsbereich 90 W-170 W - Oberfläche behandelt mit Glasperlengranulat $R_a=1,48\ \mu\text{m}$

Gemessene Parameter der Verbindungen: Glasperlengranulat							
Probe	SQ	BQ	$\frac{BQ}{SQ}$	Breite	$\varnothing B$	Erhebung	Bruchbild
	mm^2	mm^2		mm	μm	mm	
g90-2	259,7	54,9	0,21	12,2	389,1	0,10	Scherung
g110-2	273,3	125,6	0,46	12,2	325,8	0,11	Nahtbruch
g130-2	279,4	180,5	0,65	11,7	919,2	0,12	Nahtbruch
g150-2	297,6	221,3	0,74	12,0	388,9	0,27	Scherung
g170-2	337,3	270,5	0,80	13,5	1195,0	0,38	Scherung

Tabelle 10.4: Gemessene Parameter der Verbindungen aus den Vorversuchen: 90 W-170 W, mit Glasperlen gestrahlte Oberfläche

- Titanproben mit Normalkorund gestrahlte Oberfläche

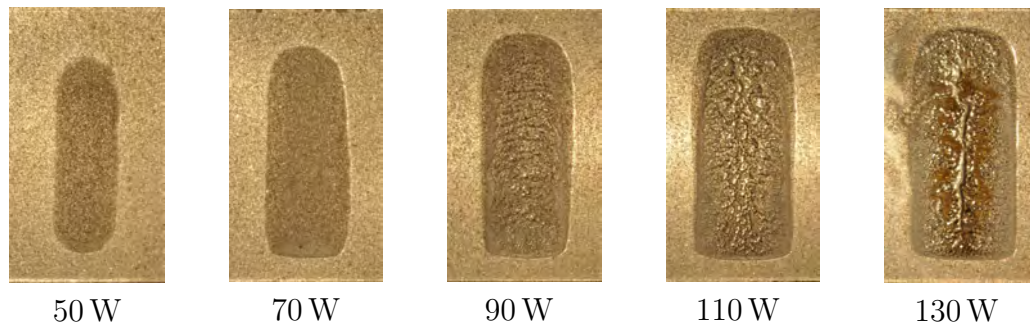


Abbildung 10.12: Grafische Darstellung der Verbindungsnahte aus den Vorversuchen: Leistungsbereich 50 W-130 W - Oberfläche behandelt mit Normalkorund $Ra=4,02\ \mu m$

Gemessene Parameter der Verbindungen: Normalkorund							
Probe	SQ	BQ	$\frac{BQ}{SQ}$	Breite	$\varnothing B$	Erhebung	Bruchbild
	mm^2	mm^2		mm	μm	mm	
a50-2	135,4	9,9	0,07	7,4	141,1	0,07	Scherung
a70-2	196,4	23,3	0,12	9,5	127,2	0,11	Scherung
a90-2	227,5	159,7	0,70	10,5	275,1	0,19	Scherung
a110-2	267,2	202,1	0,76	11,7	395,2	0,22	Nahtbruch
a130-2	285,8	231,0	0,81	12,2	438,2	0,25	Nahtbruch

Tabelle 10.5: Gemessene Parameter der Verbindungen aus den Vorversuchen: 50 W-130 W, mit Normalkorund gestrahlte Oberfläche

b) Zusammenfassende Bewertung der Verbindungen

Bei den bildlichen Aufnahmen der Verbindungsnahte erkennt man am Beginn des Verbindungsprozesses eine Aufweitung des Bläschenquerschnittes. Besonders bei den geschliffenen Titanoberflächen ist dieser Effekt der Aufweitung am stärksten ausgeprägt. Das unterschiedliche Verhalten hinsichtlich dieser Aufweitung des Bläschenquerschnittes ist auf die Absorption des Titans zurückzuführen. Je kleiner der Mittenrauwert der Oberfläche, desto geringer ist der Absorptionswert und größer die resultierende Aufweitung der Naht. Grund für die Aufweitung ist, dass der Wärmeleistungsverlust am Beginn des Verbindungsprozesses nicht gänzlich kompensiert werden kann. Bei Zunahme der Laserleistung oder der Absorption wird dieser Effekt jedoch abgeschwächt. Des Weiteren kommt es bei hohen Leistungen zur Kanalbildung durch die Bläschen, der bei weiterer Leistungserhöhung an Breite gewinnt und schlussendlich zur Ablösung der beiden Materialien führt. Es entsteht also ein Dampfpolster, der zu einer Abnahme der Zugfestigkeit führt.

c) Beurteilung der Geometrieparameter der Verbindungen

Auf Basis von Bildaufnahmen der Verbindungen, wurde für die Ermittlung diverser geometrischer Parameter auf das Bildbearbeitungsprogramm *ImageJ* zurückgegriffen. Dadurch ist es möglich, die Breite der Nähte, den Spannungs- bzw. den Bläschenquerschnitt der Proben zu ermitteln.

Unter anderem wurde daraus die relative Bläschenzahl als Verhältnis zwischen Bläschenquerschnitt und Spannungsquerschnitt rechnerisch ermittelt. Auch der mittlere Durchmesser der Bläschen und die Erhebung der Naht wurden in Tabellen festgehalten.

Durch diese Geometrieparameter wurde das Verhalten der Ausbildung der Naht in Abhängigkeit des Einflusses der Oberflächenrauigkeit und der Laserleistung untersucht.

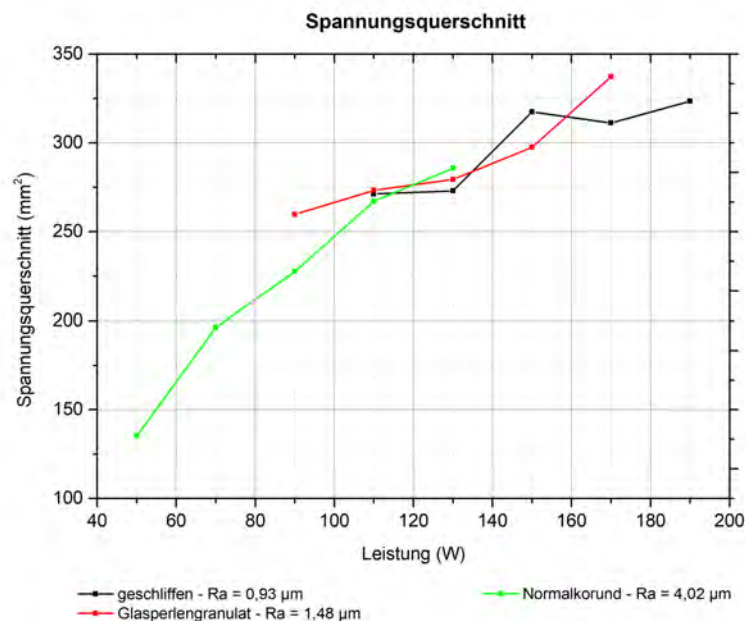


Abbildung 10.13: Verlauf des Spannungsquerschnittes für verschiedenen Oberflächentypen in Abhängigkeit der Laserleistung

In Abb. 10.13 lässt sich eine Abhängigkeit des Spannungsquerschnittes bei veränderlicher Oberflächenrauigkeit erkennen. Bei zunehmendem Rauigkeitswert der Oberfläche bleibt der Spannungsquerschnitt annähernd konstant, jedoch ergeben die entstehenden Bläschen im Spannungsquerschnitt ein unterschiedliches Bild (z.B. fein verteilte Bläschen oder Dampfkanal).

Beim Bläschenquerschnitt (siehe Abbildung 10.14) kann dieses Verhalten nicht bestätigt werden. Es lässt sich erkennen, dass die verschiedenen Verläufe versetzt zueinander sind. Dies deutet auf unterschiedliche Absorptionswerte der Oberflächen hin.

Bei steigender Rauigkeit, nimmt bei konstanter Laserleistung, die Anzahl der Bläschen zu. Grund dafür ist die Zunahme der Absorption von Titan bei größerer Rauigkeit der

Oberfläche. Ein größerer Anteil an Laserenergie wird in Wärmeenergie umgewandelt (siehe auch Kapitel 9.1.4).

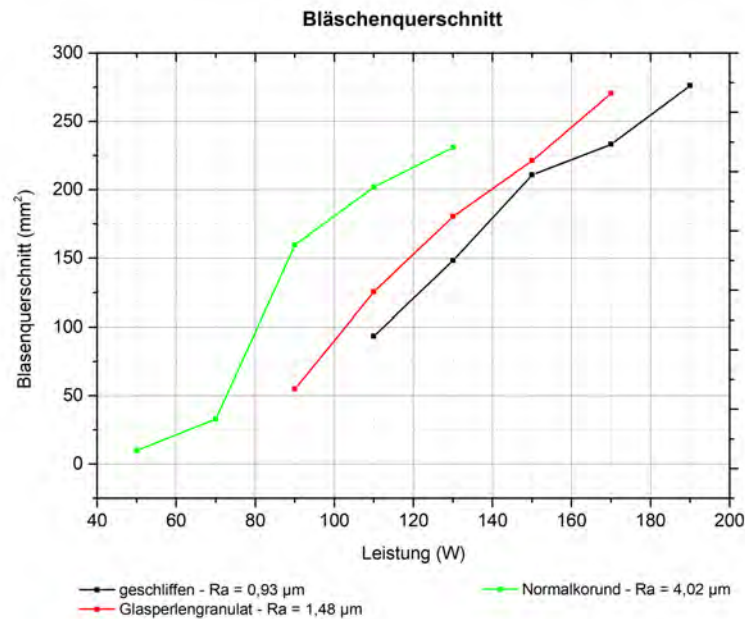


Abbildung 10.14: Verlauf des Bläschenquerschnitts für verschiedenen Oberflächentypen in Abhängigkeit der Laserleistung

Wenn die Verläufe in Abb. 10.14 betrachtet werden, kommt es bei zunehmender Leistung zu einem linearen Anstieg der Größe des mittleren Bläschenquerschnitts. Im Falle der mit Normalkorund behandelten Proben, sind die Messpunkte für den Verlauf des Bläschenquerschnitts bei geringen Leistungen (80 W abwärts) bildlich nur schwer zu ermitteln. Dieser grenzt sich aufgrund des Kontrastunterschiedes und der sehr kleinen entstandenen Bläschen nur bedingt von der Oberflächenstruktur des Titans ab.

In Abbildung 10.15 ist das Querschnittsverhältnis zwischen Bläschen- und Spannungsquerschnitt dargestellt. Man erkennt, dass der Verlauf der Kurven ähnlich dem Verlauf des Bläschenquerschnitts in Abbildung 10.14 ist. Der Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf das Absorptionsverhalten des Titans, ist in dieser Darstellung (Abb. 10.15) sehr schön ersichtlich.

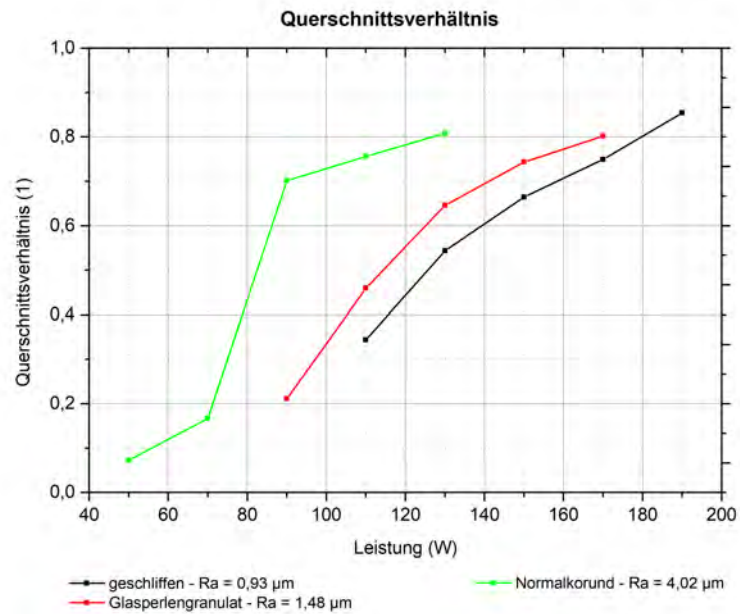


Abbildung 10.15: Verlauf des Querschnittsverhältnisses für verschiedenen Oberflächentypen in Abhängigkeit der Laserleistung

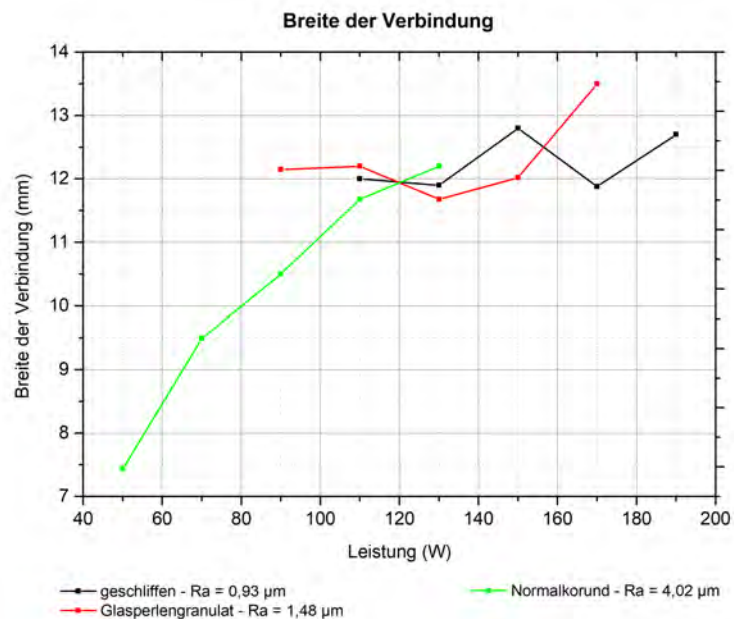


Abbildung 10.16: Verlauf der Verbindungsbreite für verschiedenen Oberflächentypen in Abhängigkeit der Laserleistung

Die Ausbildung für die Breite der Verbindung (Abb. 10.16) verhält sich ähnlich zum Verlauf des Spannungsquerschnittes (siehe Abb. 10.13). Bei einer Zunahme der Breite

gewinnt auch der Spannungsquerschnitt an Größe, sprich die Breite der Verbindung steht im direkten Zusammenhang mit der Ausbildung des Spannungsquerschnittes.

Nach diesen Erkenntnissen kann man zusammenfassen, dass der Einfluss der Oberflächenrauigkeit eine Änderung der Absorption bzw. der Bildung der Bläschen zur Folge hat. Je rauer die Oberfläche, desto mehr Wärmeenergie steht für die Bläschenbildung zur Verfügung, welches wiederum zu einer Festigkeitsänderung der Verbindung führt.

d) Auswertung der Daten aus den Zugversuchen

Um Ursachen auf das mechanische Festigkeitsverhalten der Verbindung durch den Einfluss der Bläschen im Spannungsquerschnitt zu finden, wurden die Probestücke aus den Vorversuchen durch Scherung an einer Zugprüfmaschine getestet. Die Daten aus den Zugversuchen wurden ausgewertet und grafisch aufbereitet. Es werden sowohl die Ergebnisse der unterschiedlichen Oberflächen, als auch der Vergleich aller Verläufe in Diagrammen zusammengefasst. In den Versuchsreihen für die Vorversuche wurden jeweils einzelne Messungen für die verschiedenen Laserleistung durchgeführt.

In den Abbildungen 10.18, 10.19 und 10.20 sind die maximalen Zugfestigkeiten und die Bruchdehnung bei maximaler Beanspruchung für unterschiedliche Laserleistungen dargestellt. Zusätzlich wird bei jeder geprüften Verbindung, die relative Bläschenzahl, der Bläschendurchmesser und die Erhebung des Kunststoffes der Verbindung in den Diagrammen angegeben.

In Abbildung 10.17 ist die Erhebung der Verbindungsnaht nach der Belichtung durch den Laser schematisch dargestellt. Der verwendete Messwert der Erhebung ist die Höhe der Wölbung des Kunststoffes und ist mit X gekennzeichnet.

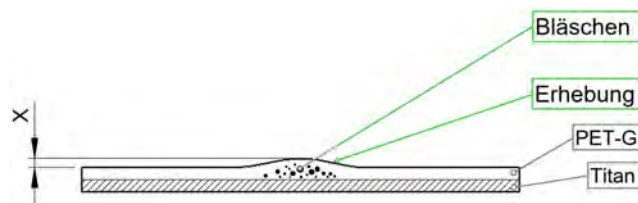


Abbildung 10.17: Schematische Darstellung der Erhebung oberhalb der Verbindungsnaht nach dem Verbindungsprozess

In den grafischen Darstellungen 10.18 bis 10.26 für die mechanische Festigkeit stehen die quadratischen Signaturen für ein Abscheren der Verbindung in der Grenzschicht, die kreisrunden Punktsignaturen hingegen für einen Bruch des PET-G-Materials quer durch die Verbindung.

Die Werte für die maximale Zugfestigkeit und die Bruchdehnung der verschiedenen Proben werden in der Tabelle 10.6 zusammengefasst.

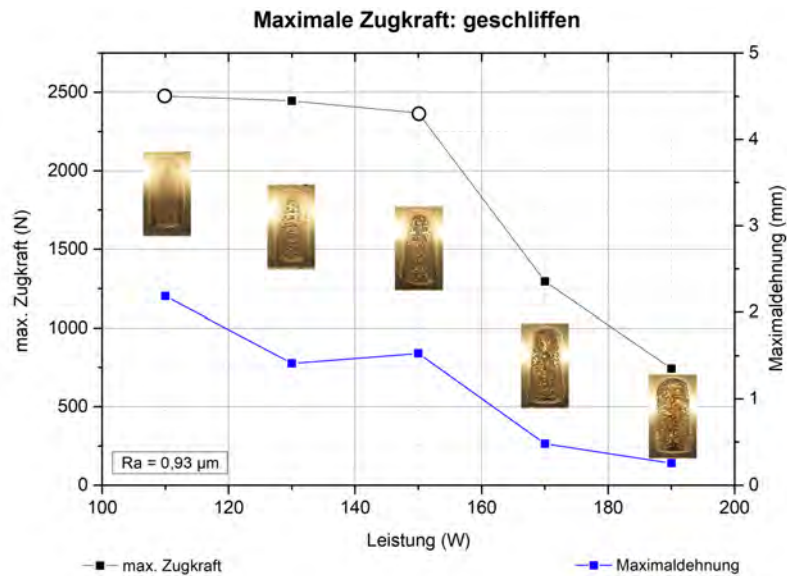


Abbildung 10.18: Darstellung der maximalen Zugfestigkeit und der Bruchdehnung in Abhängigkeit der Laserleistung für geschliffene Titanoberflächen

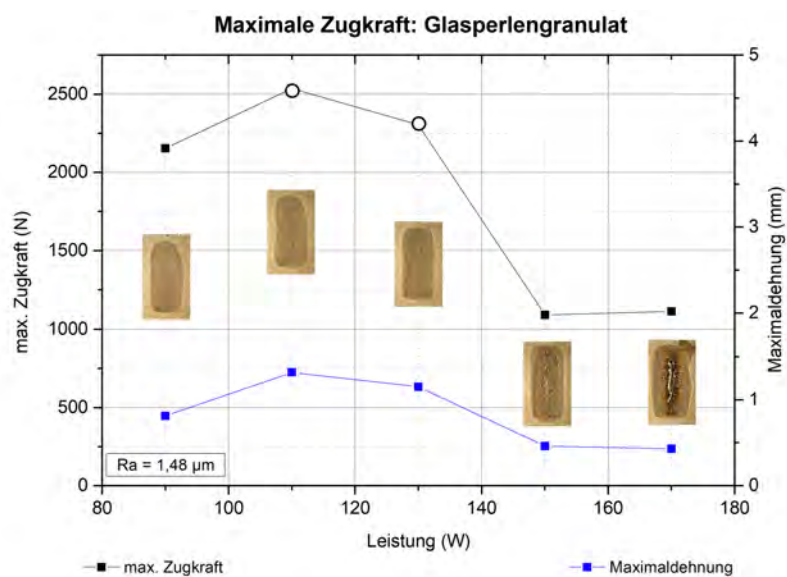


Abbildung 10.19: Darstellung der maximalen Zugfestigkeit und der Bruchdehnung in Abhängigkeit der Laserleistung für Titanoberflächen gestrahlt mit Glasperlengranulat

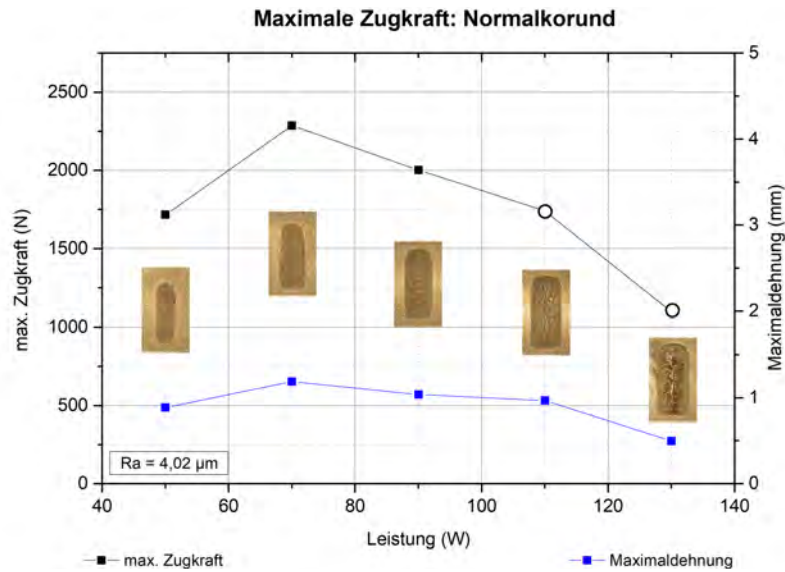


Abbildung 10.20: Darstellung der maximalen Zugfestigkeit und der Bruchdehnung in Abhängigkeit der Laserleistung für Titanoberflächen gestrahlt mit Normalkorund

Diskussion

In den Abbildungen 10.18 bis 10.20 ist ersichtlich, dass die maximale Zugkraft mit Zunahme der Rauigkeit der Oberfläche abnimmt. Bei der mit Glasperlen gestrahlten Oberfläche ist jedoch ein kleiner Widerspruch erkennbar. Bei diesem Verlauf ist die maximale Zugfestigkeit etwas größer als bei den geschliffenen Probestücken mit feinerer Oberfläche. Dies könnte darauf hindeuten, dass sich bei einem Rauigkeitswert zwischen der geschliffenen und der mit Glasperlengranulat gestrahlten Oberfläche ein Maximum der Zugfestigkeit ausbildet.

Weiters ist auch erkennbar, dass die maximale Dehnung bzw. Bruchdehnung für rauer werdende Oberflächen im Mittel abnimmt.

Gemessene Parameter der Zugversuche		
Probe	max. Zugfestigkeit	Bruchdehnung
	<i>N</i>	<i>mm</i>
geschliffen Ra=0,95 μm		
o110-2	2476,76	2,1874
o130-2	2427,18	1,9078
o150-2	2368,85	1,5274
o170-2	1295,28	0,4811
o190-2	743,47	0,2558
Glasperlengranulat Ra=1,48 μm		
g90-2	2154,89	0,8137
g110-2	2537,78	1,3195
g130-2	2303,87	1,1521
g150-2	1088,37	0,4612
g170-2	1111,88	0,4313
Normalkorund Ra=4,02 μm		
a50-2	1717,02	0,8872
a70-2	2286,75	1,1887
a90-2	2002,44	1,0389
a110-2	1740,73	0,9681
a130-2	1095,88	0,4982

Tabelle 10.6: Gemessene Parameter des Zugversuches der Verbindungen aus den Vorversuchen: max. Zugfestigkeit und Bruchdehnung - Zwick Z050

Analysiert man Abb. 10.21 - 10.23, dann ist im Anfangsbereich des Verlaufes eine abnehmende relative Bläschenzahl bei rauer werdender Oberfläche zu erkennen. Erklärbar wäre dies durch die Materialrauigkeit entstehenden Vertiefungen der Oberflächenstruktur. Diese schwächen den durch Expansion entstehenden Differenzdruck der Bläschen ab. Für die Abschwächung würde das Mehrangebot an Platz, welches durch die Tiefe der Rauigkeitsspitzen entsteht, verantwortlich sein. Dieser Umstand wirkt sich auch auf die Messwerte der Erhebung des Kunststoffes aus, was laut den Abb. 10.24 - 10.26 bestätigt wird.

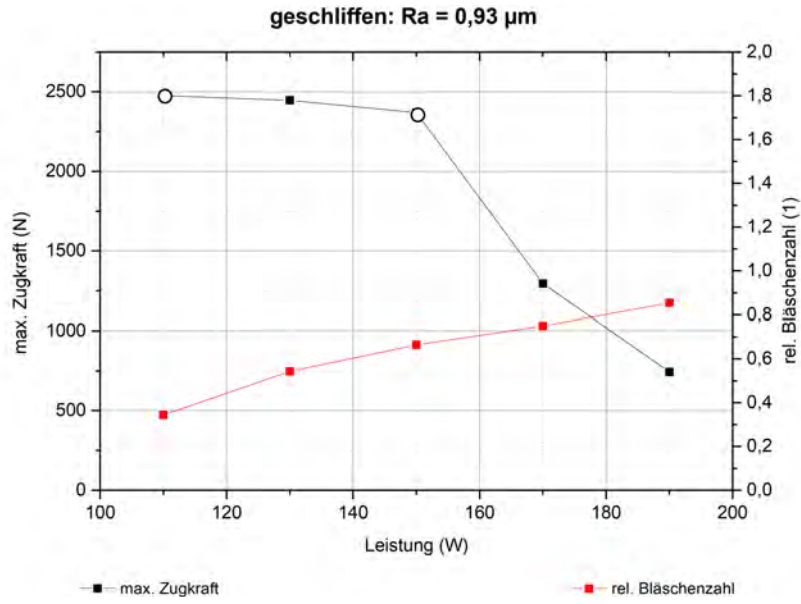


Abbildung 10.21: Darstellung der relativen Bläschenzahl in Abhängigkeit der Laserleistung für die geschliffene Titanoberfläche

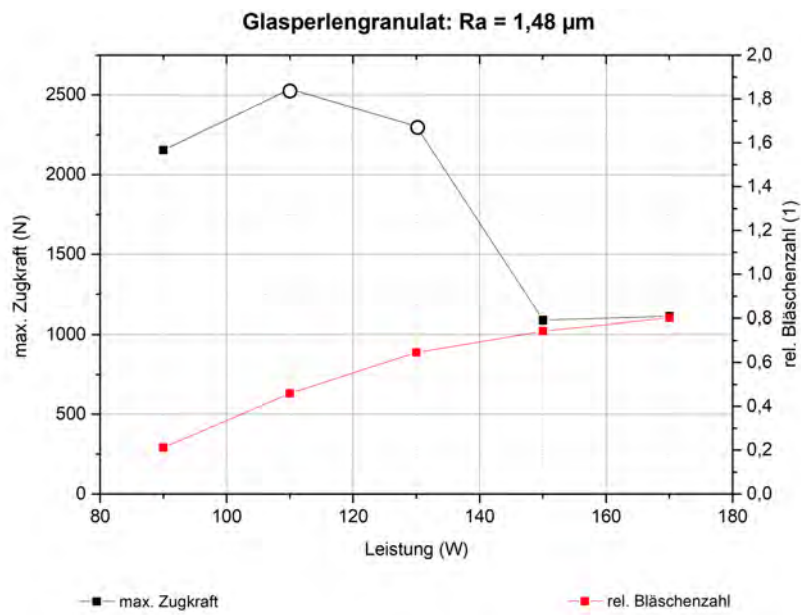


Abbildung 10.22: Darstellung der relativen Bläschenzahl in Abhängigkeit der Laserleistung für die mit Glasperlen gestrahlte Titanoberfläche

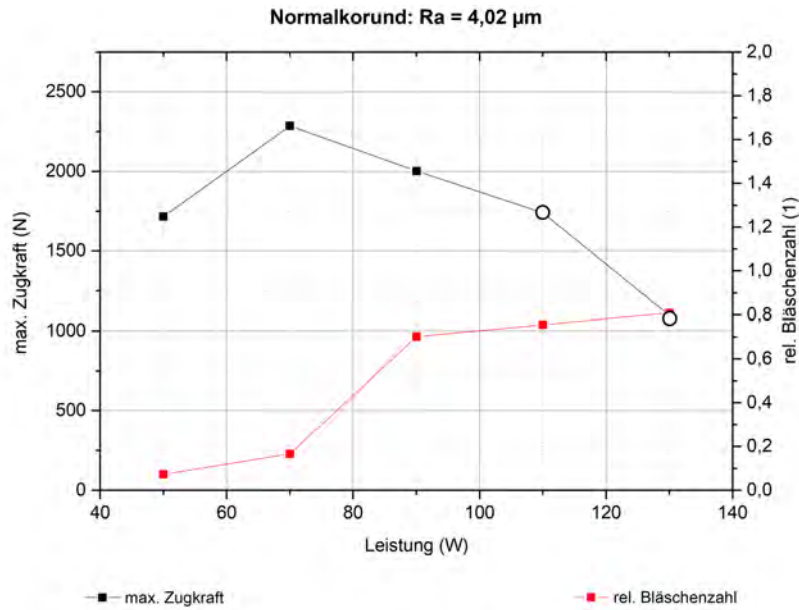


Abbildung 10.23: Darstellung der relativen Bläschenzahl in Abhängigkeit der Laserleistung für die mit Normalkorund gestrahlte Titanoberfläche

Um genauer auf die Entstehungsmechanismen der Bläschen einzugehen, wurden zusätzlich der mittlere Durchmesser der Bläschen als auch die Erhebung der PET-G-Platte oberhalb der Verbindungsstelle gemessen. Die Erhöhung gibt indirekt Auskunft über die Druckentstehung durch die Bläschen bzw. auch über die Verformung des PET-G Oberfläche.

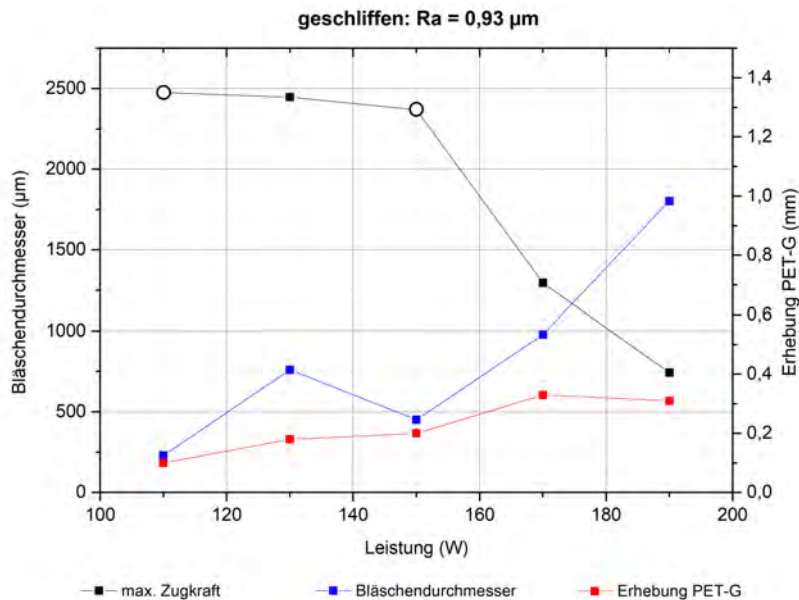


Abbildung 10.24: Darstellung des mittleren Bläschendurchmessers bzw. der Erhebung des PET-G's in Abhängigkeit der Laserleistung für geschliffene Titanoberflächen

In den Abbildungen 10.24 - 10.26 wurden die Verläufe des Bläschendurchmessers und der Erhebung der PET-G Oberfläche grafisch dargestellt. Die in den Diagrammen ersichtliche maximale Zugfestigkeit dient dabei als Orientierung für das Verhalten der Verbindung im jeweiligen Leistungsbereich.

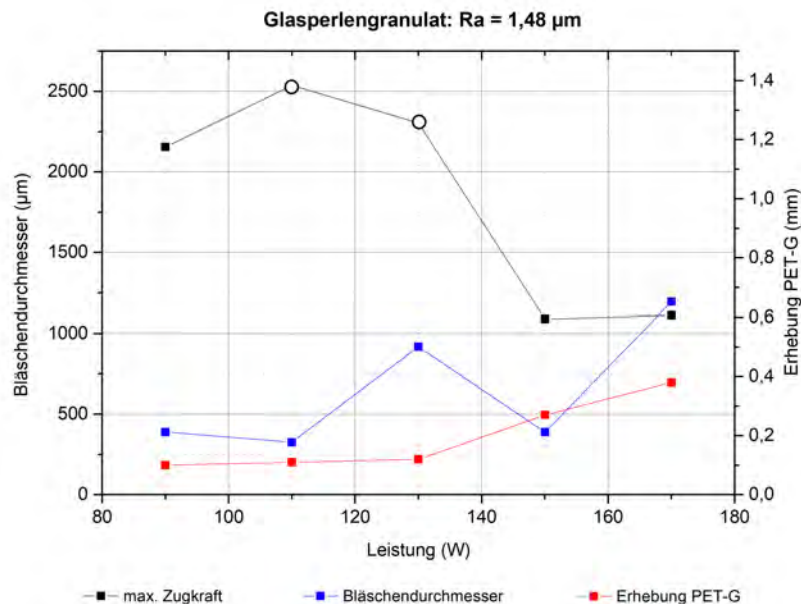


Abbildung 10.25: Darstellung des mittleren Bläschendurchmessers bzw. der Erhebung des PET-G's in Abhängigkeit der Laserleistung für die mit Glasperlen gestrahlte Titanoberfläche

Bei Betrachtung der Verläufe in den Abbildungen 10.24 - 10.26 sieht man, dass sowohl der Bläschendurchmesser als auch die Erhebung des PET-G's bei zunehmender Rauigkeit abnimmt. Dies bestätigt, dass der durch die Expansion der Bläschen entstehende Differenzdruck verringert wird. Zumindest kann man dies in der zweidimensionalen Ebene behaupten (Draufsicht auf die Verbindung).

Weiters ist bei einem Anstieg der Laserleistung, eine Zunahme der Werte für den Bläschendurchmesser als auch für die Erhebung an der Kunststoffoberfläche feststellen. Mehr Leistung führt zu größerer Absorption, höherer Wärmeentwicklung und somit zur Entstehung einer größeren Anzahl an Bläschen bzw. zu mehr Druck in der Verbindungstelle.

Betrachtet man die Messpunkte des Bläschendurchmessers bei maximaler Zugkraft, wäre zumindest bei den gestrahlten Proben (Abb. 10.25 und 10.26) die Tendenz eines lokalen Minimums erkennbar. Im Falle der geschliffenen Oberfläche (Abb. 10.24) wäre laut dieser Theorie zwischen 110-130 W ein Maximum der Zugfestigkeit gegeben.

Um das Verhalten der Festigkeitsänderung durch den Einfluss der Oberflächenrauigkeit besser einschätzen zu können, wurden in Abbildung 10.27 die Verläufe der maximalen Zugkraft der verschiedenen Oberflächen, in Abhängigkeit der Laserleistung, zusammenfassend dargestellt.

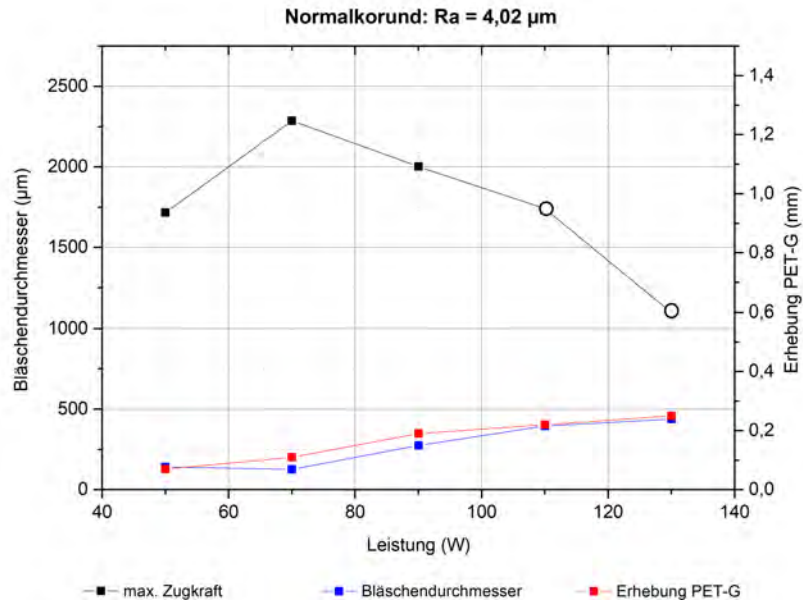


Abbildung 10.26: Darstellung des mittleren Bläschendurchmessers bzw. der Erhebung des PET-G's in Abhängigkeit der Laserleistung für die mit Normalkorund gestrahlte Titanoberfläche

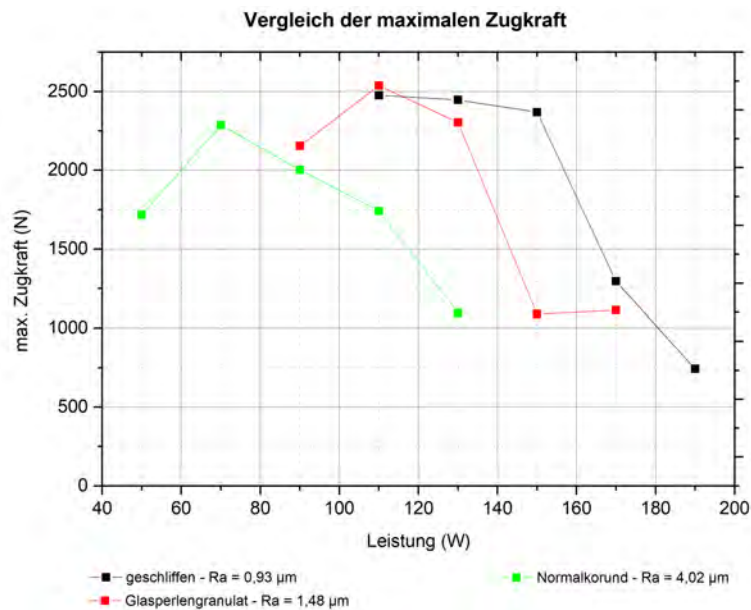


Abbildung 10.27: Vergleich der Festigkeitsverläufe für die maximale Zugfestigkeit der Verbindung bei den drei getesteten Oberflächen in Abhängigkeit der Laserleistung

Interpretation

Bei Betrachtung der Verläufe für die maximale Zugfestigkeit in Abbildung 10.27 ist für die unterschiedlich untersuchten Oberflächen jeweils ein anderes Prozessfenster für die Laserleistung erkennbar. Dieses Verhalten ist durch die veränderliche Absorptionseigenschaft des Titans bei unterschiedlichen Rauigkeitswerten der Oberfläche erklärbar. Des Weiteren ist durch die maximal erreichte Zugfestigkeit des jeweiligen Verlaufes, eine Abhängigkeit durch die Oberflächenrauigkeit des Titans erkennbar. Es lässt sich vermuten, dass es ein Maximum der Zugfestigkeit zwischen der Rauigkeit $0,93\text{-}1,48\ \mu\text{m}$ im Leistungsbereich von $110\text{-}130\ \text{W}$ gibt. In Bezug auf die Rauigkeit ist das genau jener Bereich, in dem auch die Wellenlänge des Lasers ($976\ \text{nm}$) für die Bearbeitung liegt.

Für die nachfolgenden Untersuchungen wurden Proben mit einer Rauigkeit kleiner $0,9\ \mu\text{m}$ hergestellt. Dies soll die Hypothese bestätigen, dass die Referenzrauigkeit, definiert durch die Wellenlänge des Lasers, das globale Optimum der Zugfestigkeit generiert. Somit würden Proben mit einer Oberflächenrauigkeit abweichend zur Referenzrauigkeit immer geringere Werte aufweisen.

Bei den Kurven in Abbildung 10.27 fällt außerdem auf, dass es im Bereich hoher Leistungen zu einem massiven Abfall der Zugfestigkeit kommt. Dieser wird durch die größer werdenden Bläschen, die sich in weiterer Folge zu einem Dampfkanal verbinden, hervorgerufen. Der Dampfkanal kann in seiner Größe so zunehmen, dass ein Dampfpolster entsteht. Dieser führt dann bereits bei sehr geringen Zugkräften zu einer Trennung der Verbindung.

Wenn man die Abnahme der Festigkeit der Verläufe unterschiedlicher Rauigkeiten vergleicht, ist der Gradient der Festigkeitsabnahme umso größer, je feiner die Oberfläche ist.

In den weiteren Untersuchungen wird auf die bei Prozessbeginn schmalere Nahtbreite, die Ursachen für die Erhebung der Kunststoffoberfläche sowie der Bläschenbildung eingegangen.

10.3 Temperaturmessung

Die Temperaturmessung ermöglicht es, während des Fügevorganges Aussagen über die Qualität der Verbindung zu treffen. In dieser Arbeit wird Titan mit PET-G verbunden. Da der Kunststoff eine Zersetzungstemperatur von $> 280\text{ °C}$ aufweist, kann mit großer Sicherheit gesagt werden, dass der Verbindungsprozess für optimale Eigenschaften unterhalb dieser Temperatur stattfinden muss.

Durch die Temperaturmessung wird versucht, einen Zusammenhang zwischen der auftretenden Wölbung und der Temperatur an der Oberfläche des Kunststoffes zu finden. Außerdem kann durch die Messung der Grenzflächentemperatur die Ursache der Entstehungsmechanismen der Bläschen genauer analysiert werden. Für die Temperaturen an der Oberfläche des Kunststoffes und der Temperaturentwicklung in der Grenzschicht werden unterschiedliche Versuchsaufbauten verwendet (siehe Unterpunkt 7.2.1 und 7.2.2).

Prinzipiell gibt es mehrere Möglichkeiten, die Temperatur zu messen. Einerseits mit einer Wärmebildkamera oder einem Pyrometer, wobei die Empfindlichkeit des Sensors eine große Rolle spielt, andererseits mit Thermoelementen. Bei Verwendung von Thermoelementen muss der Emissionsgrad des Werkstoffes nicht definiert werden, was im Vergleich zu Pyrometern einen Vorteil darstellt.

10.3.1 Versuchsdurchführung

Um die Festigkeitseigenschaften bei Oberflächenrauheitswerten, die kleiner als die Wellenlänge des Lasers sind, zu untersuchen, wurden zusätzlich Proben mit einer Oberflächenrauigkeit kleiner $0,976\text{ }\mu\text{m}$ hergestellt.

Aufgrund der divergierenden Breitenverteilung wurde bei der Probenherstellung auf die Optimierung der Nahtgeometrie geachtet. Dabei wurde mit einer Wartezeit des Lasers am Beginn des Verbindungsprozesses gearbeitet. Parallel dazu wurde die Oberflächentemperatur des Kunststoffes mittels Wärmebildkamera ermittelt.

Bei der folgenden Auflistung der Ergebnisse wurde auf die Daten des Zugversuches und die bei der Herstellung der Proben ermittelten Daten der Temperaturmessung an der Oberfläche (Unterpunkt 10.3.3) separat eingegangen.

a) Optimierung der Nahtgeometrie

Um eine Verbesserung hinsichtlich der Aufweitung der Naht zu erreichen, wurde mit einer Wartezeit des Lasers zu Beginn des Verbindungsprozesses gearbeitet.

Die Wartezeit am Anfang der Bestrahlung führt zu einer Akkumulation von Wärmeenergie bzw. zu einem Aufheizprozess der Titanprobe, was Vorteile hinsichtlich gleichmäßiger Breitenverteilung bringt. Je mehr Laserleistung eingestellt bzw. je rauer die Oberfläche gewählt wird, desto geringer fällt die Wartezeit aus. Die Wärmeleitung, die absorbierte Strahlungsenergie und die geometrischen Bedingungen im Umfeld der Verbindung haben einen Einfluss auf die Nahtbreite. Zum Beispiel kommt es in den Randgebieten des Titanblechs zu einer Wärmekonzentration, da weniger Material für

die Wärmeabgabe zur Verfügung steht, als vergleichsweise in der Mitte der Probe. Dies führt automatisch zu einem Anstieg der Temperatur im Randbereich. Mit variabel gesteuerter Laserleistung bzw. veränderbarem Vorschub kann diesem Prozess entgegen gewirkt werden. Man könnte dies auch manuell im Code der Robotersteuerung berücksichtigen, was aber für jede Leistung separat überlegt werden müsste.

b) Verbindungsherstellung

Für die Erzeugung der Verbindung wurden Titanproben mit unterschiedlicher Oberflächenrauigkeit hergestellt. Es wurden unter anderem Probestücke mit einer Oberflächenrauigkeit von $Ra=0,68\ \mu\text{m}$ (Feinschliff (f): P320), $Ra=0,95\ \mu\text{m}$ (geschliffen (o)) und $Ra=1,48\ \mu\text{m}$ (Glasperlengranulat (g)) verwendet.

Die Struktur der verschiedenen Oberflächen ist in Abbildung 10.28 dargestellt. Die Bilder wurden bei 48-facher Vergrößerung unter dem Auflichtmikroskop aufgenommen.

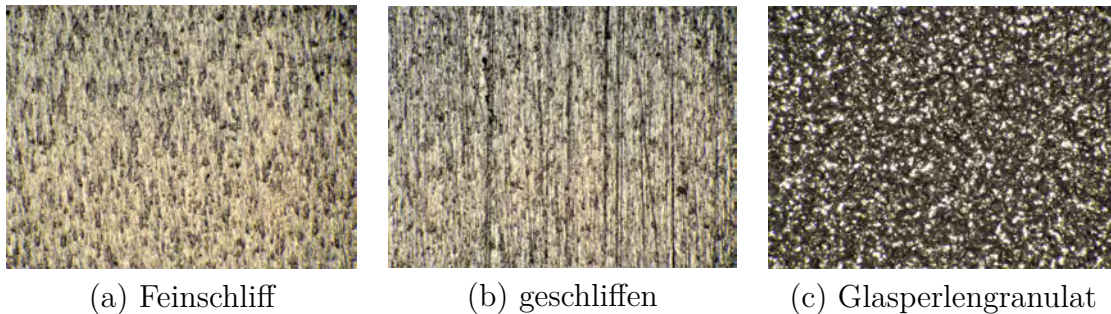


Abbildung 10.28: Aufnahmen der verschiedenen Oberflächenstrukturen unter dem Auflichtmikroskop bei 48-facher Vergrößerung: Feinschliff - $Ra=0,68\ \mu\text{m}$ (a), geschliffen - $Ra=0,95\ \mu\text{m}$ (b) und gestrahlt mit Glasperlen - $Ra=1,48\ \mu\text{m}$ (c)

Mit der Erkenntnis aus den vorherigen Versuchen wurden nur Leistungen verwendet, bei denen es zu keiner Kanalbildung als auch zu keiner Ablösung durch die Bläschen kommt. Dort ist ein starker Abfall der mechanischen Festigkeit die Folge. Ersichtlich ist die Änderung der Zugfestigkeit in Abbildung 10.27.

Das Leistungsintervall bei gleichbleibendem Vorschub von $2\ \text{mm/s}$ wurde wie folgt gewählt:

- Feinschliff (f), $Ra=0,68\ \mu\text{m}$: 110 W - 150 W
- geschliffen (o), $Ra=0,95\ \mu\text{m}$: 110 W - 150 W
- Glasperlengranulat (g) $Ra=1,48\ \mu\text{m}$: 90 W - 130 W

In den Abbildung 10.29 bis 10.34 sind die Verbindungsnahte der verschiedenen Proben dargestellt.

In den Tabellen 10.7 - 10.9 steht SQ für Spannungsquerschnitt, BQ für Bläschenquerschnitt und $\varnothing B$ für den mittleren Durchmesser der Bläschen. Für die Bruchcharakteristik steht *B* für Bruch quer durch die Naht und *S* für Abscherung. Der Eintrag *Zeit* entspricht der Wartezeit des Lasers am Nahtanfang.

- Titanproben mit Feinschliff

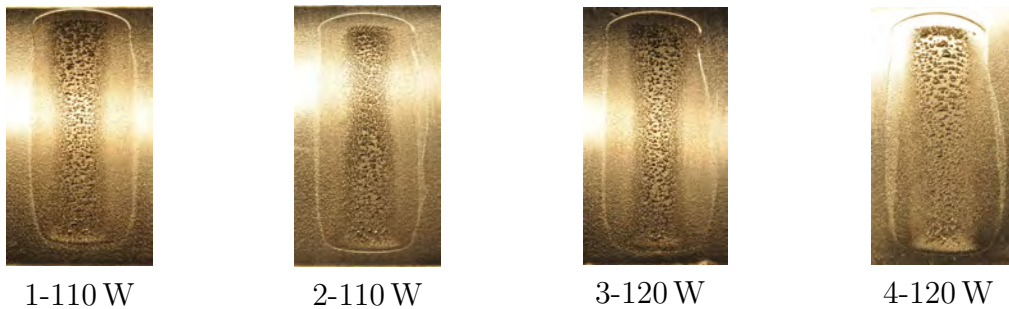


Abbildung 10.29: Grafische Darstellung der Verbindungsnahte mit optimierter Nahtgeometrie-Teil 1: Leistungsbereich 110 W-120 W - Titanoberfläche als Feinschliff ausgeführt - $R_a=0,68\ \mu\text{m}$

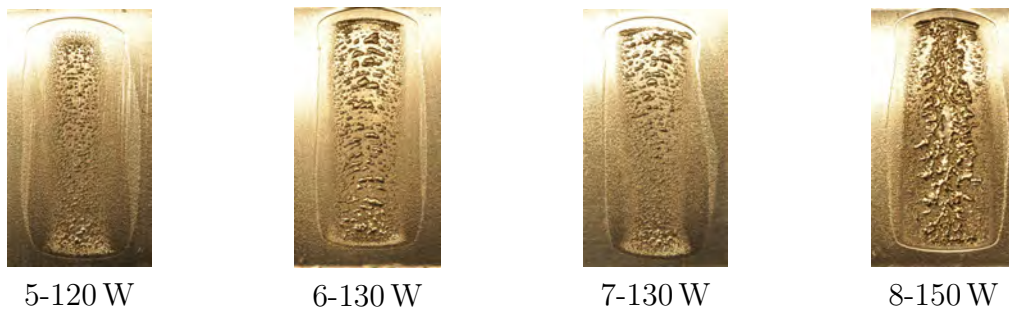


Abbildung 10.30: Grafische Darstellung der Verbindungsnahte mit optimierter Nahtgeometrie-Teil 2: Leistungsbereich 120 W-150 W - Titanoberfläche als Feinschliff ausgeführt - $R_a=0,68\ \mu\text{m}$

Bei der Probe mit 110 W kann man erkennen, dass der Einfluss der ungleichen Wärmeleitung entlang der Verbindung zu einer Akkumulation der Wärme an den Randgebieten führt. Am Beginn und am Ende ist die gleiche Aufweitung erkennbar. Hier sehen wir aufgrund zu niedriger Laserleistung den Fall, bei dem nur eine Anpassung der Parameter (Leistung bzw. Vorschub) zu einer gleichmäßigen Breite führt.

Für die Proben 3, 4 und 7 wurde die Wartezeit des Lasers etwas zu lange gewählt. Hier sind der Bläschenquerschnitt als auch der mittlere Durchmesser der Bläschen stärker ausgebildet als im weiteren Verlauf der Naht. Für die Proben 5 und 6 stellt sich ein annähernd konstanter Breitenverlauf ein.

Bei 150 W sehen wir die Vorstufe zur Ausbildung eines Dampfkanals durch das Zusammenschließen der Bläschen. Weiters kommt es zu einer starken Aufweitung des

Bläschen- und Spannungsquerschnittes. Hier muss die Wartezeit des Lasers auf einen höheren Wert korrigiert werden, um eine konstante Breitenverteilung zu bekommen. Aufgrund der Erkenntnis aus den vorher getesteten Proben ist bei diesen hohen Leistungsbereichen ab 150 W kein Optimum hinsichtlich der Zugfestigkeit erreichbar, auch wenn ein konstanter Breitenverlauf vorliegt.

Gemessene Parameter der Verbindung: Feinschliff									
POS	Probe	SQ	BQ	$\frac{BQ}{SQ}$	Breite	ØB	Erhebung	Zeit	Bruch
		mm^2	mm^2		mm	μm	mm	s	
1	f-110-2,3	292,5	159,2	0,54	12,1	218,0	0,05	2,3	S
2	f-110-2,2	290,0	143,0	0,49	11,5	192,0	0,05	2,2	S
3	f-120-2,2	301,0	152,1	0,50	11,6	208,2	0,05	2,2	S
4	f-120-2,2v2	303,0	187,1	0,62	11,8	266,0	0,05	2,2	S
5	f-120-2	314,5	165,4	0,53	11,9	235,2	0,05	2,0	B
6	f-130-2,3	305,2	207,4	0,68	12,1	525,1	0,13	2,3	S
7	f-130-2,2	295,7	188,3	0,64	11,8	433,0	0,07	2,2	S
8	f-150-1,5	335,6	247,6	0,74	13,1	610,4	0,20	1,5	B

Tabelle 10.7: Gemessene Parameter der Verbindungen mit optimierte Nahtgeometrie: Titanoberfläche als Feinschliff ausgeführt - Ra=0,68µm

Die Probenbenennung in der Tabellenspalte *Probe* steht jeweils für den Oberflächentyp (*f* für Feinschliff, *o* für geschliffene und *g* für glasperlengestrahlte Oberflächen), die verwendete Laserleistung in Watt und die Wartezeit des Lasers bei Nahtoptimierung.

Falls Proben mit gleichen Parametern mehrmals beschrieben werden, wird die Probenanzahl nach dem Buchstaben *v* angegeben.

- Titanproben mit geschliffener Oberfläche

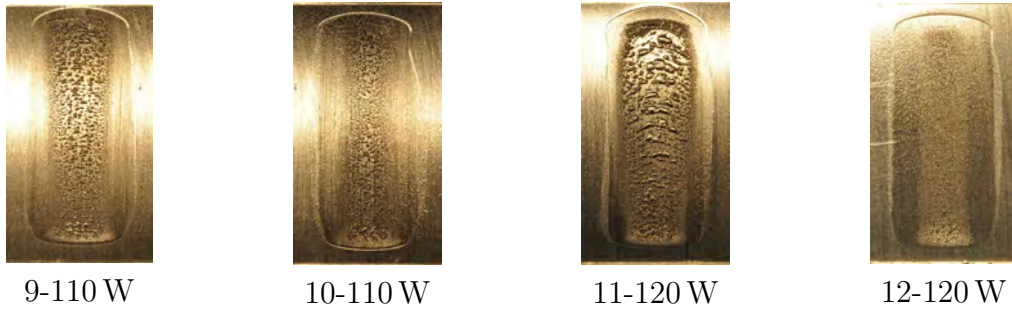


Abbildung 10.31: Grafische Darstellung der Verbindungsnahte mit optimierter Nahtgeometrie-Teil 1: Leistungsbereich 110 W-120 W - geschliffene Titanoberfläche - $R_a=0,95\ \mu\text{m}$

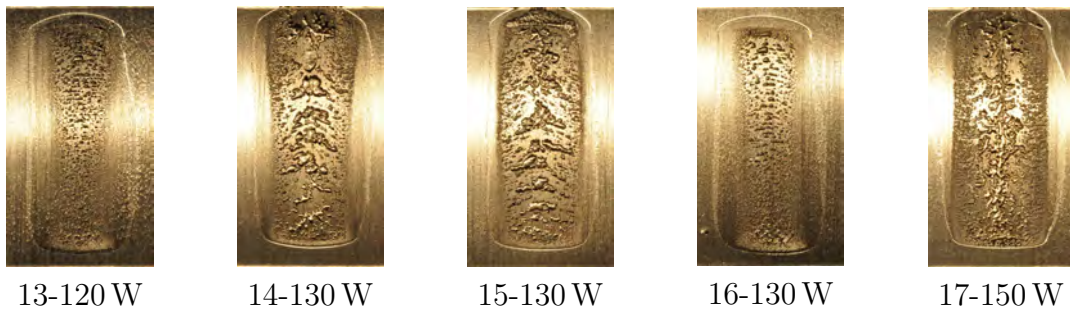


Abbildung 10.32: Grafische Darstellung der Verbindungsnahte mit optimierter Nahtgeometrie-Teil 2: Leistungsbereich 120 W-150 W - geschliffene Titanoberfläche - $R_a=0,95\ \mu\text{m}$

Für die Proben mit den Positionen 10, 11, 12, 15, 16 und 17 ist der Breitenverlauf entlang der Verbindung annähernd konstant, wobei bei den Proben 9 und 13 eine leichte Aufweitung an den Randzonen vorliegt. Beim Probestück 14 wurde die Wartezeit zu lange gewählt. Es kommt zu einer verstärkten Breitenzunahme am Beginn der Verbindung.

Für die Probe 17 kann man schon im Vorhinein sagen, dass die Festigkeit dieser Verbindung drastisch kleiner sein wird als die bei den vorher abgebildeten Proben dieses Oberflächentyps. Man sieht sehr schön die Vorstufe des Ausbildens eines Dampfkanals durch die Bläschen.

Die gesamten Probenoberflächen wurden mit einem Rauigkeitsmessgerät vermessen, um gleiche Verhältnisse hinsichtlich Absorption zu bekommen. Es kann jedoch sein, dass die Ergebnisse durch die Prüfnadel an den verschiedenen Oberflächen unterschiedliche Toleranzen bei der Messung aufweisen. Bei genauer Betrachtung der geschliffenen Proben fällt auf, dass die Proben mit gleicher Leistung unterschiedliche Ausbildungen der Bläschen aufweisen. Vor allem bei 120 W ist dieser Aspekt verstärkt zu sehen. Einerseits könnten geringe Unregelmäßigkeiten der Oberfläche zu

Unterschieden in der Bläschenverteilung führen, andererseits kann auch die Wartezeit des Lasers Einfluss darauf nehmen. Bei der Wartezeit kommt es am Beginn des Bearbeitungsprozesses titanseitig zu einer Akkumulation der Wärmeenergie, welche einen Aufheizprozess des Werkstoffes initiiert. Es kann durch die unterschiedlich eingestellten Wartezeiten des Lasers zu anderen Grenzschichttemperaturen kommen. Deshalb auch die unterschiedliche Bildung von Bläschen.

Bei einem Vergleich der Probe 16 mit anderen bei 130 W hergestellten Proben ist eine starke Diskrepanz des Erscheinungsbildes erkennbar.

Laut Tabelle 10.8 muss man auch den Unterschied der eingestellten Wartezeit betrachten. In diesen Leistungsbereichen können schon Zehntelsekunden zu Veränderungen der Bläschenform und -verteilung führen.

Ab einer Laserleistung von 130 W findet ein Zusammenschluss der Bläschen statt. Dies ist bei den Proben 14 und 15 sehr schön ersichtlich. Aufgrund der gewonnen Erkenntnisse aus den vorherigen Versuchen, stellt diese Leistung eine Vorstufe für die Grenze dar, bei der keine optimalen Festigkeitseigenschaften der Verbindung erreicht werden.

Gemessene Parameter der Verbindung: geschliffene Titanoberfläche									
POS	Probe	SQ	BQ	$\frac{BQ}{SQ}$	Breite	∅B	Erhebung	Zeit	Bruch
		<i>mm²</i>	<i>mm²</i>		<i>mm</i>	<i>μm</i>	<i>mm</i>	<i>s</i>	
9	o-110-1,9	295,2	179,0	0,61	12,4	291,5	0,10	1,90	S
10	o-110-1,75	278,0	144,0	0,52	11,7	172,0	0,02	1,75	B
11	o-120-1,8	303,6	218,0	0,72	11,6	398,0	0,10	1,80	S
12	o-120-1,6	297,5	135,6	0,46	12,1	91,0	0,05	1,60	S
13	o-120-1,7	279,0	177,0	0,63	10,7	230,0	0,05	1,70	B
14	o-130-2,2	335,4	244,7	0,73	12,8	748,6	0,18	2,20	B
15	o-130-1,9	309,0	248,0	0,80	12,3	588,0	0,18	2,00	B
16	o-130-1,9v2	300,0	189,7	0,63	12,2	286,0	0,08	1,90	B
17	o-150-1,8	345,5	285,3	0,83	13,6	560,0	0,20	1,80	B

Tabelle 10.8: Gemessene Parameter der Verbindungen mit optimierte Nahtgeometrie: geschliffene Titanoberfläche - Ra=0,95 μm

- Titanproben mit Glasperlen gestrahlte Oberfläche

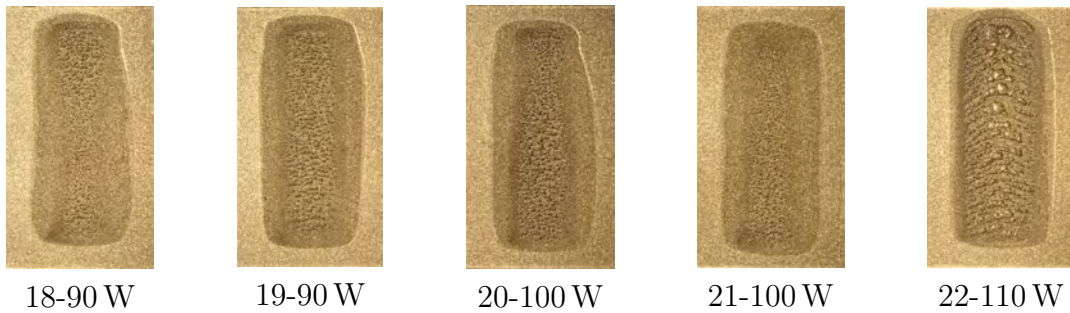


Abbildung 10.33: Grafische Darstellung der Verbindungsnähten mit optimierter Nahtgeometrie-Teil 1: Leistungsbereich 90 W-100 W - Titanoberfläche gestrahlt mit Glasperlengranulat - $R_a=1,48\mu\text{m}$

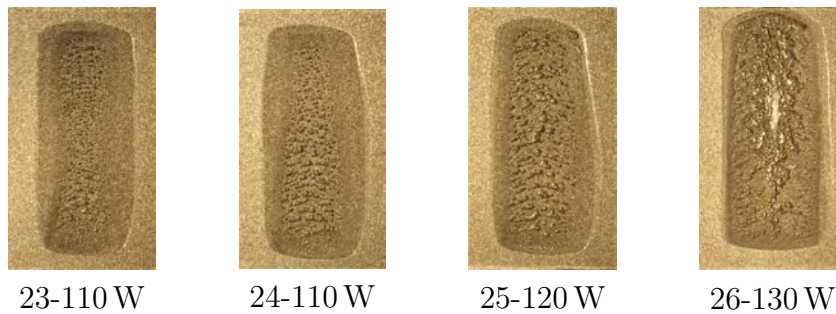


Abbildung 10.34: Grafische Darstellung der Verbindungsnähte mit optimierter Nahtgeometrie-Teil 2: Leistungsbereich 110 W-130 W - Titanoberfläche gestrahlt mit Glasperlengranulat - $R_a=1,48\mu\text{m}$

Bei den Proben 18 und 19, hergestellt mit 90 W, ist bis auf den Bläschenquerschnitt und dessen Verteilung, ein ähnlicher mittlerer Bläschendurchmesser erkennbar. Genau das Gegenteil liegt bei den Proben mit 100 W Laserleistung vor. Hier ist der Breitenverlauf annähernd konstant, aber dafür die Bläschengröße unterschiedlich.

Trotz der gleichen Parameter für die Proben mit einer Laserleistung von 110 W, kommt es bei Probe 22 zu einer veränderten Ausbildung der Bläschen. Das Erscheinungsbild würde größerer Leistung entsprechen. Bei den Proben 23 und 24 lässt sich das Bläschenbild sehr schön zwischen den angrenzenden Leistungen von 110 W und 120 W einordnen.

Bei Probestück 26 ist bereits eine Ansammlung von Bläschen ersichtlich. Dies ist schon ein erstes Zeichen für die Abnahme der Festigkeitseigenschaften, ohne auf die geometrischen Parameter der Verbindung (SQ , BQ oder auch Durchmesser der Bläschen) näher einzugehen. Würde man die Laserleistung weiter steigern, könnte man eine Zunahme des Bläschendurchmessers als auch die Ausbildung eines Dampfkanals beobachten.

Gemessene Parameter der Verbindung: Glasperlengranulat									
POS	Probe	SQ	BQ	$\frac{BQ}{SQ}$	Breite	$\varnothing B$	Erhebung	Zeit	Bruch
		mm^2	mm^2		mm	μm	mm	s	
18	g-90-1,5	265,8	123,9	0,47	12,3	210,0	0,05	1,50	S
19	g-90-1,5v2	284,9	138,4	0,49	12,5	232,2	0,05	1,50	S
20	g-100-1,3	279,7	142,9	0,51	12,0	262,0	0,03	1,30	S
21	g-100-1,3v2	273,1	125,4	0,46	12,1	209,0	0,04	1,30	B
22	g-110-1,2	292,1	204,8	0,70	12,1	759,1	0,12	1,20	B
23	g-110-1,25	279,8	143,7	0,51	11,5	325,0	0,05	1,25	B
24	g-110-1,2v2	284,5	156,6	0,55	12,5	384,0	0,08	1,20	S
25	g-120-1,2	288,1	187,2	0,65	12,2	589,0	0,11	1,20	S
26	g-130-1,2	317,6	244,4	0,77	12,6	540,0	0,20	1,20	B

Tabelle 10.9: Gemessene Parameter der Verbindungsnahte mit optimierter Nahtgeometrie: Titanoberfläche gestrahlt mit Glasperlengranulat - Ra=1,48 μm

10.3.2 Auswertung der Daten aus den Zugversuchen: Optimierte Nahtgeometrie

Durch die Anpassung der Nahtbreite bzw. des konstanten Verlaufes des Bläschenquerschnittes, wird eine Zunahme der mechanischen Festigkeitskennwerte erwartet.

Des Weiteren wird auch vermutet, dass es durch den Temperatureinfluss an der Verbindungsstelle des Kunststoffes zu lokalen Eigenschaftsänderungen im Kunststoff kommt. Vor allem bei der temperaturbeeinflussten Verbindungsstelle kommt es zu einer Versprödung des Kunststoffes. Diese führt zu einem vorzeitigen Bruch des PET-G-Materials. Zusammenhängend mit der Bläschenverteilung wirken die Bläschen als Unregelmäßigkeiten im Gefüge des Kunststoffes und tragen somit zum frühzeitigen Bruch bei.

Bei einer separaten Untersuchung des PET-G-Materials wurde für den mechanischen Festigkeitskennwert eine maximale Zugfestigkeit von 3263 N ermittelt. Trotz einer Dehnung von 400 % trat kein Bruch auf. Es liegt also nahe, dass es nur durch Eigenschaftsänderungen zum vorzeitigen Bruch des Materials kommen und die gesamte Festigkeit der Verbindung nicht ausgereizt werden kann.

Die Werte für die maximale Zugfestigkeit und die Bruchdehnung der Proben unterschiedlicher Oberfläche werden in Tabelle 10.10 zusammengefasst.

Gemessene Parameter der Zugversuche: optimierte Naht			
POS	Probe	max. Zugfestigkeit	Bruchdehnung
		<i>N</i>	<i>mm</i>
1	f-110-2,3	2389,89	0,8984
2	f-110-2,2	2453,89	1,1142
3	f-120-2,2	2639,90	1,2242
4	f-120-2,2v2	2262,20	0,9662
5	f-120-2,0	2413,36	1,0505
6	f-130-2,3	2394,64	0,8833
7	f-130-2,2	2503,61	1,1311
8	f-150-1,5	2156,73	0,9561
9	o-110-1,9	2741,12	1,3165
10	o-110-1,75	2566,41	1,2171
11	o-120-1,8	2494,24	1,1942
12	o-120-1,6	2522,80	1,2105
13	o-120-1,7	2362,29	1,1222
14	o-130-2,2	2733,83	1,3181
15	o-130-1,9	2598,66	1,1555
16	o-130-1,9v2	2477,48	1,1145
17	o-150-1,8	1954,08	0,7245
18	g-90-1,5	2199,90	1,0024
19	g-90-1,5v2	2418,93	1,1298
20	g-100-1,3	2624,20	1,1889
21	g-100-1,3v2	2529,96	1,1689
22	g-110-1,2	2250,24	0,9661
23	g-110-1,25	2544,40	1,1985
24	g-110-1,2v2	2494,91	1,0912
25	g-120-1,2	2484,96	1,1339
26	g-130-1,2	1586,28	0,5688

Tabelle 10.10: Ermittelte Parameter aus den Zugversuchen der Verbindungen mit optimierter Nahtgeometrie: maximale Zugfestigkeit und Bruchdehnung - Zwick Z050

In den Abbildungen 10.35, 10.36 und 10.37 sind die verschiedenen Mittelwerte der Messdaten aus den Zugversuchen visualisiert. Der Mittelwert wird durch den arithmetische Mittelwert definiert. Dieser wird aus mehreren gleichen Proben (gleiche Laserleistung) berechnet und zusätzlich die Standardabweichung (Streuung) um diesen Wert bestimmt. Die Streuung ist mit einem vertikalen Balken am Messpunkt eingezeichnet. Dort wo keine Streuung eingezeichnet ist, wurde ein einzelner Messwert verwendet. Dies ist in jenem Bereich, in dem durch das Bläschenbild und die Verteilung der Bläschen keine guten Festigkeitseigenschaften der Verbindung entstehen.

Außerdem sind die aufgenommenen Parameter aus der Bildanalyse (mittlerer Bläschendurchmesser und die Erhebung des PET-G's) als Verlauf dargestellt.

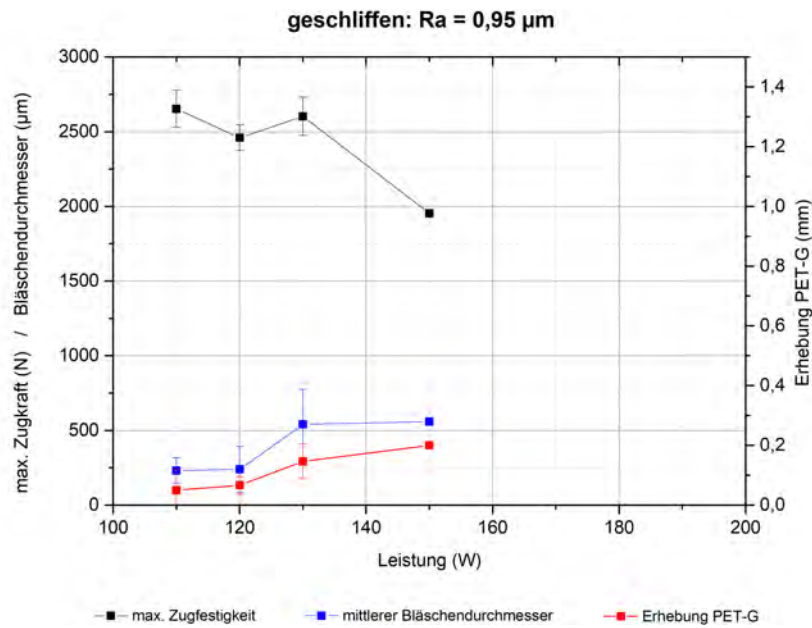


Abbildung 10.35: Darstellung der Verläufe für die Zugfestigkeit, den mittleren Bläschendurchmesser und die Erhebung des Kunststoffes in Abhängigkeit der Laserleistung - geschliffene Titanoberfläche

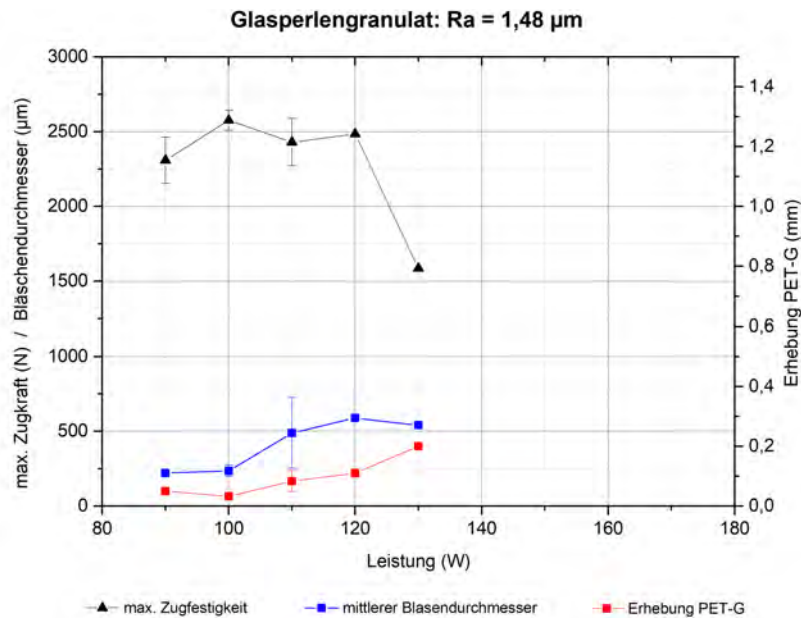


Abbildung 10.36: Darstellung der Verläufe für die Zugfestigkeit, den mittleren Bläschendurchmesser und die Erhebung des Kunststoffes in Abhängigkeit der Laserleistung- Titanoberfläche gestrahlt mit Glasperlengranulat

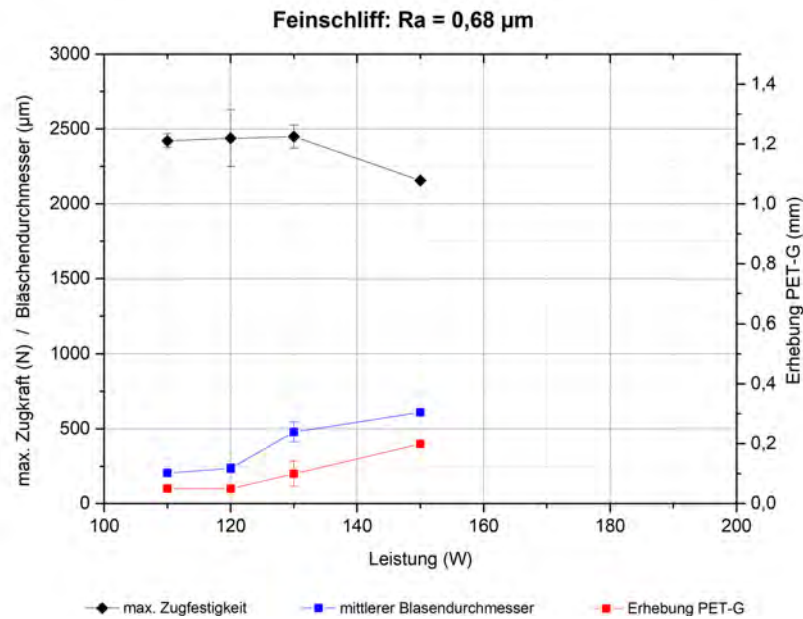


Abbildung 10.37: Darstellung der Verläufe für die Zugfestigkeit, den mittleren Bläschendurchmesser und die Erhebung des Kunststoffes in Abhängigkeit der Laserleistung - Titanoberflächen mit Feinschliff

Diskussion

Vergleicht man die Diagramme unterschiedlicher Oberflächen miteinander, dann ist ein Maximum der Zugfestigkeit bei der geschliffenen Oberfläche zu erkennen. Es lässt sich auch bestätigen, dass Oberflächen, die einen Rauigkeitswert kleiner oder größer als den Referenzrauigkeitswert (definiert durch die Wellenlänge des Lasers: hier $0,976 \mu\text{m}$) aufweisen, hinsichtlich der Festigkeitseigenschaften benachteiligt werden. Durch diese Diagramme wird auch eine Zunahme der Verläufe für den mittleren Bläschendurchmesser und der Erhebung des PET-G's bei steigender Leistung ersichtlich. Vor allem, wenn es zum Abfall der Zugfestigkeit kommt, wird der Gradient für den Verlauf der Erhebung steiler. Dies ist der Punkt, ab dem sich die Bläschen nach und nach zu einem Dampfkanal zusammenschließen. Außerdem lässt sich parallel dazu eine Zunahme des Gradienten für den mittleren Bläschendurchmesser erkennen. Dies bestätigt die oben getroffene Vermutung hinsichtlich des Zusammenschließens der Bläschen.

Laut den Ergebnissen der Zugversuche liegen genau dann die Maximalwerte vor, wenn es zu einem Anstieg des Bläschendurchmessers und der Erhebung kommt. In diesem Bereich sind optimale mechanische Eigenschaften der Verbindung zu erwarten. Bei den geschliffenen Proben ($Ra = 0,95 \mu\text{m}$) ist dies nur bedingt der Fall.

In Abbildung 10.35 ist ein Einbruch der mechanischen Festigkeit bei 120 W ersichtlich. Dies ist aber genau dort, wo die Festigkeit (wie in Abb. 10.18 in Kapitel 10.2.2 zu sehen) zumindest über dem dritten Messpunkt liegen sollte. Der in Abb. 10.18 erkennbare Verlauf der Festigkeit scheint plausibel, was bei Verlauf in Abbildung 10.35

nicht zutrifft.

Auch die in Abb. 10.35 eingezeichnete Streuung für den Messpunkt bei 120 W, würde den plausibel erscheinenden Wert von rund 2650 N nicht einschließen.

Ursache für den ungünstigen Verlauf hinsichtlich der Festigkeit könnte sein, dass die Probenoberflächen mittels Handschliff präpariert wurden. Wenn man die geschliffene Oberfläche mit der einer gestrahlten Oberfläche vergleicht, erreicht man nur mit Flachsleifmaschinen eine ähnliche Gleichmäßigkeit. Trotz den durch die Messung erreichten Mittenrauwertes für geschliffenen Probenoberflächen mit $R_a = 0,96 \mu\text{m}$ ist das Problem des nicht homogenen Verlaufes der Rauigkeit gegeben.

Um in die Nähe von $0,976 \mu\text{m}$ für den Mittenrauwert der Oberfläche zu kommen, könnte ein Glasperlengranulat mit einer Körnung von $40\text{-}70 \mu\text{m}$ gewählt werden. Dadurch könnte der Effekt einer ungleichmäßigen Rauigkeitsverteilung an der Oberfläche auf ein Minimum reduziert werden.

In einer weiteren Publikation (siehe [3]) wird durch die Verwendung von Korund (Korngröße: $40\text{-}75 \mu\text{m}$) als Strahlmittel eine Oberflächenrauheit von ca. $R_a = 1,13 \mu\text{m}$ erreicht.

Durch Vergleich mit der in unserer Arbeit erreichten Oberflächenrauigkeit stellt man fest, dass Glasperlengranulat eine etwas feinere Rauigkeit erzeugt als Normalkorund mit gleicher Korngröße.

Aufgrund der prinzipiell ähnlichen Tendenzen in den Verläufen für die mechanische Festigkeit der Verbindung, kann man zusammenfassend den Bereich für das Optimum der Zugfestigkeit mit den geometrisch ermittelten Parametern,

- Bläschendurchmesser: $230 \mu\text{m} - 500 \mu\text{m}$
- Erhebung der PET-G Oberfläche: $< 0,12 \text{ mm}$

eingrenzen. Für die Laserleistung muss aufgrund der unterschiedlichen Absorption der Oberfläche auf den Oberflächentyp eingegangen werden. Für die Titanoberflächen sind die Leistungsbereiche folgende:

- Feinschliff (f): 115 W-125 W
- geschliffen (o): 110 W-130 W
- gestrahlt mit Glasperlengranulat (g): 95 W-105 W

Diese Bereiche gelten für eine Vorschubbewegung des Lasers mit 2 mm/s .

In Abbildung 10.38 wird der Vergleich zwischen den getesteten Proben aus den Vorversuchen (Unterpunkt 10.2.2) mit den Werten für optimierte Nahtgeometrien (Unterpunkt 10.3.2) gezogen.

Dabei stehen die Verlaufskurven der Zugfestigkeit mit strichlierter Linie für die im Vorversuch getesteten Proben. Die Versuchsreihen in diesen Vorversuchen dienten

hauptsächlich dazu, um einerseits den Leistungsbereich einzugrenzen und andererseits das ungefähre mechanische Verhalten zu bestimmen. Daher wurden nur einzelne Messungen für die unterschiedlichen Laserleistungen durchgeführt.

Die Verläufe mit durchgezogener Linie entsprechen den Verbindungen mit optimierten Parametern. Sie geben den Verlauf des Mittelwertes für die maximale Zugfestigkeit der getesteten Proben an. Zusätzlich ist die Streuung der ersten drei Messpunkte im Bereich des Maximalwertes für die Zugfestigkeit gegeben.

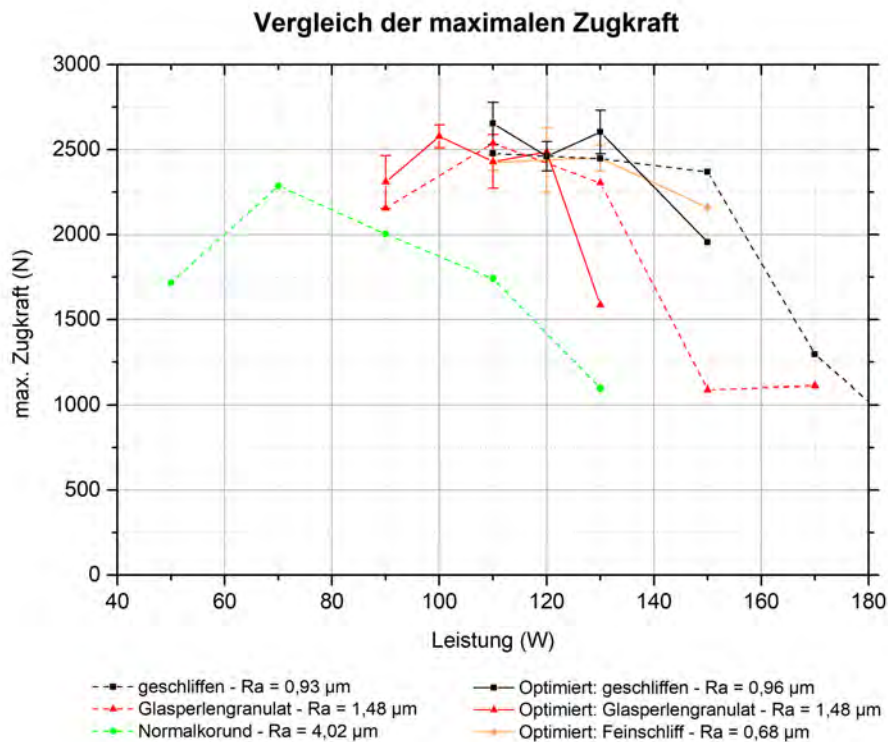


Abbildung 10.38: Vergleich der Festigkeitsverläufe für die maximale Zugfestigkeit für verschiedene Titanoberflächen in Abhängigkeit der Laserleistung: Gegenüberstellung der Verbindungen aus den Vorversuchen und der mit optimierter Nahtgeometrie

Den Versuchen entsprechend kann die Tendenz bestätigt werden, dass die mechanischen Eigenschaften der Verbindungen bei einer Oberflächenrauheit im Bereich der Wellenlänge des Lasers ihr Optimum aufweisen.

Wenn man die neu erfassten Kennwerte mit den zuvor gewonnen Werten aus den Zugversuchen (Unterpunkt 10.2.2) miteinander vergleicht, ist eine Verbesserung der Festigkeitseigenschaften zu erkennen.

Interpretation

Beim Vergleich der Verläufe für die maximale Festigkeit treten im Leistungsbereich von 100 W bis 130 W, die Maxima für alle drei Oberflächentypen auf. Dort wo die Werte der Oberflächenrauigkeit im Bereich der Wellenlänge des Lasers liegen, sind die höchsten mechanischen Festigkeiten erkennbar.

Bei einigen Proben kommt es schon zum frühzeitigen Versagen durch einen Nahtbruch der PET-G-Phase. Um etwaige Ursachen dafür zu finden, wurden während des Bearbeitungsprozesses zusätzliche Temperaturmessungen an der Grenzfläche durchgeführt. Dadurch werden Erkenntnisse über das Temperaturarbeitsfenster beim Verbindungsprozess gewonnen. Die kritische Temperatur wird durch den Zusammenschluss der Bläschen zu einem Dampfkanal definiert. Es kommt dabei zu einer beginnenden Ablösung, die dann in weiterer Folge einen Dampfpolster entstehen lässt. Diese kritische Temperatur gilt es weitestgehend zu vermeiden, um optimale Festigkeitseigenschaften der Verbindung zu erreichen.

Außerdem wurde auch die Entstehung von kleinen Rissen bei der Bildung der Bläschen in der Verbindungszone beobachtet, die in Kombination mit der Eigenschaftsänderung des Kunststoffes zu einem frühzeitigen Versagen der Verbindung führen können.

Durch die vorliegende Temperatur kann direkt Rückschluss auf die Ausbildung der Bläschen gezogen und eruiert werden, ob im optimalen Prozessfenster bearbeitet wurde oder es bereits zu einer Eigenschaftsänderung im Kunststoff gekommen ist.

10.3.3 Messung der Oberflächentemperatur

Die Versuche haben gezeigt, dass sich ab einer bestimmten Leistungsschwelle eine Wölbung an der Kunststoffoberfläche oberhalb der Verbindungsnaht ausbildet. Da die Vermutung vorliegt, hierbei die Temperatur für die Warmfestigkeitsgrenze (bei PET-G: 68 °C - DIN 53452-B) überschritten zu haben, wurde mithilfe der IR-Kamera die Temperatur an der Oberfläche untersucht.

Aufgrund der Bläschenbildung resultiert ein Gasdruck, der durch Expansion abgebaut wird. Einerseits wird die flüssige Kunststoffphase in die Oberflächenstruktur des Titans geschleudert bzw. geht dort eine Reaktion ein, andererseits kommt es zur minimalen Erhebung an der Kunststoffoberfläche. Je höher die Temperatur bei der Bläschenbildung in der Grenzschicht, desto höher auch der resultierende Gasdruck bzw. die Erhebung.

Parallel zur Herstellung der Proben für die Zugversuche wurde die Oberflächentemperatur aufgenommen. Dies soll erste Erkenntnisse hinsichtlich der Temperaturverteilung bringen. Durch die Implementierung einer Wärmebildkamera (IR-Kamera) (siehe Kapitel 7.2.1), kann die Wärmestrahlung, welche von der Bearbeitungszone freigesetzt wird, verarbeitet werden. Für den Spektralbereich der Kamera sind Kunststoffe nicht transparent. Es kann also nur die Oberflächentemperatur untersucht werden [24].

Für die Untersuchung der Grenzflächentemperatur zwischen den beiden Materialien muss auf Wärmebildkameras zurückgegriffen werden, die kurzwellige Wärmestrahlung verarbeiten (1,5 bis 2 µm). Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Tem-

peratur mittels Thermoelement zu bestimmen. Das Thermoelement kann punktuell appliziert und der Messwert ausgelesen werden.

a) Ermittelte Messwerte der Oberflächentemperatur des Kunststoffes

Für die Messpunkte der Oberflächentemperatur wurden vier verschiedene Positionen verwendet, um die Temperatur mittels eines Wärmebildes, welches durch die Wärmebildkamera *FLIR One Pro* aufgenommen wurde, auszulesen. Es wurden zu Beginn, in der Mitte, am Ende und nach dem Ausschalten des Lasers Informationen über die Temperaturverteilung an der Oberfläche gesammelt. Der Beginn ist so definiert, dass erst nach der Wartezeit des Lasers ein Bild aufgenommen wird. Die Mitte ist durch die Probenmitte und das Ende kurz vor der Beendigung des Verbindungsprozesses charakterisiert. Nach dem Ausschalten des Lasers wurden mehrere Bilder aufgenommen und jene Aufnahme verwendet, bei der sich die Temperatur am höchsten ausgebildet hat. Bei den Wärmebildern wurde immer die Maximaltemperatur ausgelesen und dokumentiert, um einerseits die Maximaltemperatur am Kunststoff für die Eigenschaftsänderungen zu erhalten und andererseits die Dynamik der Bläschen zu erklären. Diese Maximaltemperatur hinkte der aktuellen Position des Lasers hinterher.

In der Tabelle 10.11 sind die gemessenen Maximaltemperaturen der verschiedenen Positionen des Lasers aufgelistet bzw. auch die durchschnittliche Temperatur angegeben.

Gemessene Temperaturwerte an der Oberfläche des Kunststoffes									
POS	Probe	T_B	T_M	T_E	T_{Nach}	T_{MAX}	T_{\odot}	R_m	Erhebung
		$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	N/mm^2	mm
Glasperlengranulat Ra=1,48 μm									
-	g-90-1,3	44,2	66,5	71,8	72,0	72,0	63,6	2745,1	0,00
20	g-100-1,3	46,4	67,0	76,1	78,3	78,3	66,9	2624,2	0,03
23	g-110-1,25	43,2	69,0	70,1	73,1	73,1	64,0	2544,4	0,05
geschliffen Ra=0,96 μm									
-	o-110-1,9	47,6	70,5	73,6	68,1	73,6	65,0	2229,6	0,00
10	o-110-1,75	48,0	72,8	73,4	75,5	75,5	67,4	2566,4	0,00
11	o-120-1,8	54,4	82,9	90,8	83,5	90,8	78,0	2494,2	0,10
(12	o120-1,6	48,1	69,8		69,7	69,8	62,5	2522,8	0,05)
13	o-120-1,7	50,8	78,1	79,8	71,9	79,8	70,2	2362,3	0,05
16	o-130-1,9v2	53,3	82,5	86,5	84,7	86,5	76,8	2477,5	0,15
Feinschliff Ra=0,68 μm									
2	f-110-2,2	54,4	74,4	76,2	77,2	77,2	70,6	2453,9	0,05
3	f-120-2,2	54,9	76,7	73,5	74,2	76,7	69,8	2639,9	0,05

Tabelle 10.11: Gemessene Oberflächentemperaturwerte der verschiedenen Proben an der Kunststoffoberfläche - FLIR One Pro

In der Tabelle 10.11 steht T_B für die Temperatur am Beginn, T_M für die Mitte, T_E am Ende und T_{Nach} für die Temperatur nach dem Verbindungsprozess. Die Durchschnittstemperatur T_{\circ} wird durch den arithmetischen Mittelwert der Temperaturwerte an den vier Positionen definiert. Zusätzlich zu den Temperaturwerten wird die Erhebung und die maximale Zugfestigkeit der Proben angegeben.

Diskussion

In Tabelle 10.11 konnte bei der Verbindung o-120-1,6 der Temperaturmesswert am Ende der Verbindung nicht aufgenommen werden. Die Probe 12 wird bei den nachträglichen Analysen nicht miteinbezogen, ist aber zum Vergleich der Ergebnisse gelistet.

Durch die Betrachtung der Durchschnittswerte für die Temperatur erkennt man, dass es bei der Kunststoffoberfläche im Bereich der Warmfestigkeitsgrenze (DIN53461-B bei PET-G: 68 °C) erstmals zu Wölbungserscheinungen kommt. Zumindest findet bei dieser Temperatur der Beginn der Wölbung statt. Die Höhe der Wölbung wurde mit einem Messschieber ermittelt. Erhebungen $< 0,05$ mm konnten durch anhand von Lichtspiegelung an der Oberfläche des Kunststoffes, im Gegensatz zur unbearbeiteten Oberfläche, eruiert werden.

Bei der Prüfung der Warmfestigkeitsgrenze eines Kunststoffes wird ein Standardprobekörper mit rechteckigem Querschnitt verwendet und einer Dreipunktbiegung mit konstanter Last unterworfen. Je nach Prüfmethode wird mit Gewichten eine unterschiedliche Randfaserspannung erzeugt. Bei einer Erwärmung mit konstanter Heizrate darf eine vorgegebene Randfaserdehnung nicht überschritten werden. Diese Grenztemperatur ist dann die Warmfestigkeitstemperatur des Kunststoffes [26].

Betrachtet man zusätzlich die Maximaltemperatur für diesen Bereich zwischen 0,025 - 0,05 mm, so stellt man fest, dass sich diese immer unterhalb der Vicat-Temperatur (DIN53460-B bei PET-G: 82 °C) aufhält.

Um die Vicat-Temperatur zu ermitteln kommt ein Prüfverfahren zur Anwendung. Dabei kommt es zum Einsatz einer Nadel, die mit einer vorgegebenen Prüfkraft in den Kunststoff gedrückt wird. Es kommt zu einer Erwärmung mit einer konstanten Heizrate. Erreicht die Nadel eine bestimmte Eindringtiefe, ist die Prüfung abgeschlossen und die Vicat-Temperatur ist erreicht. Sie gibt Aufschluss über die praktische Dauereinsatzgrenze [25]. Erst oberhalb dieser Vicat-Temperatur kann eine Erhebung beobachtet werden, die mehr als 0,05 mm beträgt.

All diese Temperaturwerte wurden für eine 2 mm dicken Kunststoff an seiner Oberfläche gemessen. Bei einer dünneren Kunststoffauflage steigen diese Werte an, je näher man sich der Grenzschicht annähert.

10.3.4 Untersuchung der Oberflächentemperatur für das gesamte Leistungsspektrum

Um bessere Aussagen hinsichtlich der Erhebung an der Kunststoffoberfläche treffen zu können, wurde ein größerer Leistungsbereich untersucht. Tatsache ist, dass die Einkopplung der Strahlungsenergie von der Oberflächenrauigkeit des Titans abhängt. Die dadurch generierte Temperatur in der Grenzschicht kann durch die Laserleistung beeinflusst werden und ist für die Entstehung der Bläschen im Kunststoff verantwortlich. Da der Kunststoff für alle Titanoberflächen die gleichen thermischen Eigenschaften besitzt und in weiterer Folge das thermische Verhalten untersucht wird, werden für die nächsten Versuche mit Glasperlengranulat gestrahlte Titanoberflächen ($R_a=1,48\ \mu\text{m}$) verwendet. Grund dafür ist die gleichmäßige Verteilung des Mittenrauwertes über die gesamte Oberfläche.

Das gesamte Leistungsspektrum wird als zulässiges Prozessfenster für den Verbindungsprozess angesehen, in dem es einerseits zum erstmaligen Erscheinen kleiner Bläschen oder andererseits zur Ausbildung eines Dampfpolsters kommt. Durch die vorherigen Versuche konnte auch gezeigt werden, dass bei sehr kleinen Bläschen nicht unbedingt eine Erhebung entsteht.

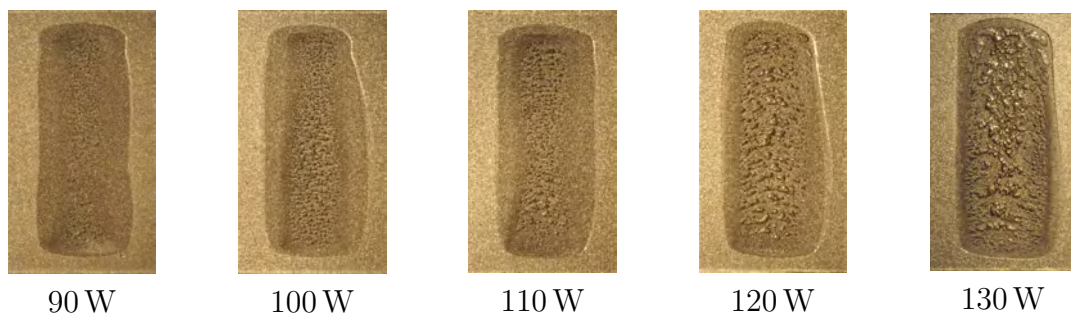


Abbildung 10.39: Grafische Darstellung der Verbindungsnahte für das gesamte Leistungsspektrum des Verbindungsprozesses-Teil 1: Leistungsbereich 90 W-130 W - Glasperlengranulat mit $R_a=1,48\ \mu\text{m}$



Abbildung 10.40: Grafische Darstellung der Verbindungsnahte für das gesamte Leistungsspektrum des Verbindungsprozesses-Teil 2: Leistungsbereich 150 W-190 W - Glasperlengranulat mit $R_a=1,48\ \mu\text{m}$

Die Verbindungen bei unterschiedlich eingestellten Laserleistungen sind in den Abbildungen 10.39 und 10.40 grafisch dargestellt. Die Messwerte der Oberflächentemperatur und der Erhebung oberhalb der Kunststoffoberfläche sind in Tabelle 10.12 aufgelistet.

a) Analyse der Verbindungen

Bei der bildlichen Darstellung der Verbindungen kann man die Zunahme und die Veränderung des Bläschendurchmessers bei steigender Leistung sehr schön erkennen. Der eingestellte Leistungsbereich, wie in Abbildung 10.39 ersichtlich, ist jener, der für die Zugversuche verwendet wurde. In diesem Leistungsbereich sind die maximalen Festigkeitseigenschaften lokalisiert.

Bei höheren Leistungen kommt es zum Abfall dieser Eigenschaften. In Abbildung 10.40 sind diese Verbindungen dargestellt und es ist zusätzlich zum Zusammenschluss der Bläschen eine Verfärbung des Titans an der Grenzschicht erkennbar. Erst wenn dort der Bereich für die Zersetzungstemperatur des Kunststoffes erreicht wird, kommt es auch zu einer Verfärbung des Polymers.

Gemessene Temperaturwerte an der Kunststoffoberfläche - $\epsilon=0,93$								
POS	Probe	T_B	T_M	T_E	T_{Nach}	T_{MAX}	T_{\odot}	Erhebung
		$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	mm
Glasperlengranulat Ra=1,48 μ m								
-	g-90-1,3	43,5	65,4	70,7	70,9	70,9	62,6	0,03
20	g-100-1,3	45,7	65,9	74,9	77,1	77,1	65,9	0,03
23	g-110-1,25	42,5	67,9	69,0	71,9	71,9	62,8	0,05
25	g-120-1,2	43,7	69,5	80,9	85,7	85,7	69,9	0,11
-	g-130-1,2v2	47,2	71,6	82,9	86,3	86,3	72,0	0,15
-	g-150-1	44,8	74,0	85,9	92,2	92,2	74,2	0,25
-	g-160-1	41,9	76,4	89,4	91,8	91,8	74,9	0,22
-	g-170-1	44,1	79,1	92,8	97,6	97,6	78,4	0,22
-	g-180-1	40,5	75,6	90,1	93,0	93,0	74,8	0,25
-	g-190-1	44,6	75,6	108,5	111,2	111,2	85,0	0,50

Tabelle 10.12: Gemessene Oberflächentemperatur des Kunststoffes bestimmt durch die Wärmebildkamera FLIR-One-Pro: Ermittelt für glasperlengestrahelte Probeoberflächen für das gesamte Leistungsspektrum des Verbindungsprozesses

In Abbildung 10.41 sind die verschiedenen Bereiche der beobachteten Bläschenkonfigurationen dargestellt. Des Weiteren sind die Warmfestigkeitsgrenze (WfG), die VICAT-Temperatur (VICAT) als auch die zulässige Höhe der Wölbung des Kunststoffes als Linien im Diagramm eingetragen.

Diskussion

In der grafischen Darstellung 10.41 sieht man, dass es zu optimalen Festigkeitseigenschaften kommt, wenn sowohl die Durchschnittstemperatur T_{\circ} unter der Warmfestigkeitsgrenze (WfG-Linie) des Kunststoffes liegt als auch die Maximaltemperatur T_{MAX} die Vicat-Temperatur (VICAT-Linie) noch nicht erreicht hat. In diesem Fall sind Erhebungen im Bereich von 0,12 mm zulässig. Diese Höhe der Wölbung von 0,12 mm wurde aus den Ergebnissen der Versuche ermittelt. Bei Erhebungen über 0,12 mm, sind keine optimalen Eigenschaften hinsichtlich der mechanischen Zugfestigkeit zu erwarten.

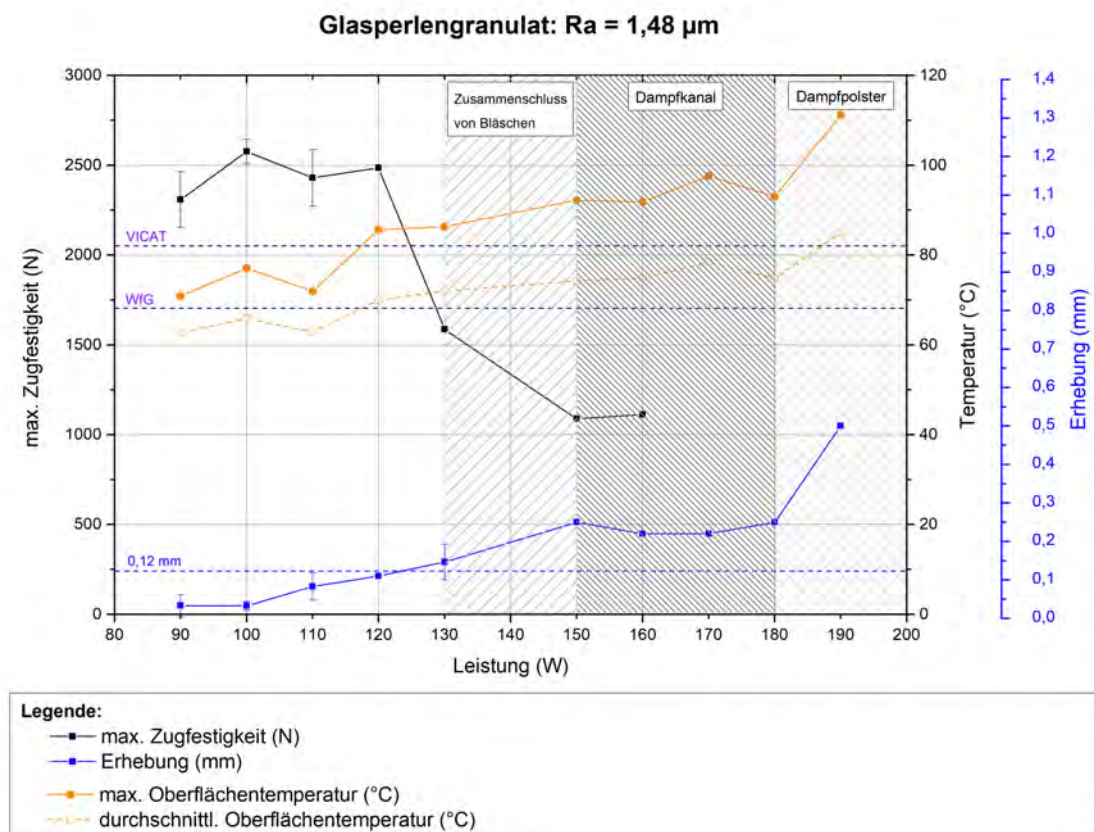


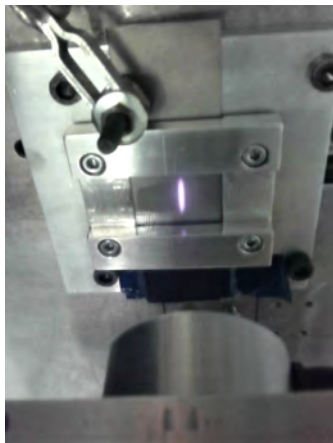
Abbildung 10.41: Darstellung der Oberflächentemperatur und der Erhebung in Abhängigkeit der Leistung für glasperlengestrahelte Oberflächen - Ra = 1,48 μ m

Die Linien in Abbildung 10.41 beschreiben Grenzwerte bzw. Bedingungen (Warmfestigkeitsgrenze, VICAT-Temperatur und 0,12 mm Erhebung), die beim Verbindungsprozess nicht überschritten werden sollten. Bleibt man unter diesen Grenzwerten (Linien), befindet man sich im Gebiet für optimale Festigkeitseigenschaften der Verbindung. Ab einer Laserleistung von 150 W wird keine dieser Bedingungen mehr erfüllt und es kommt zu einem drastischen Abfall der Festigkeit der Verbindung.

Der Zeitpunkt für die Bildung eines Dampfkanals wird durch die Endtemperatur T_E charakterisiert. Wird der Bereich von $90\text{ }^\circ\text{C}$ erreicht, beginnen die Bläschen sich zu einem Kanal zusammenzuschließen und die dabei entstehenden Dämpfe in den Bläschen können sich im Kanal ausbreiten. Somit nimmt die Breite dieses Kanals zu und ein Dampfpolster entsteht. Dadurch löst sich der Kunststoff großteils vom Titan ab und Belastungen können nicht mehr übertragen werden.

b) Temperaturverteilung an der Kunststoffoberfläche

Durch die orts aufgelösten Aufnahmen der Oberflächentemperatur des Kunststoffes mittels Wärmebildkamera ist die geringe Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffes ersichtlich (siehe auch Abbildung 10.42). Die Strahlungsenergie des Lasers wird vom Titan absorbiert und in Wärmeenergie umgewandelt. Einerseits wird die gesamte Titanprobe durch Wärmeleitung erwärmt, andererseits ein Teil der Wärme an den Kunststoff abgegeben. Die maximale Oberflächentemperatur bildete sich deutlich verzögert hinter dem mit konstanter Geschwindigkeit bewegten Laserspot aus. In Abbildung 10.42 ist dies grafisch dargestellt.



(a) reales Bild



(b) Wärmebild

Abbildung 10.42: Vergleich von realem Bild mit Wärmebild: Beide Bilder aufgenommen mit der Wärmebildkamera FLIR-One-Pro während des Verbindungsprozesses

Die aktuelle Lage des Laserspots ist in Abbildung 10.42 (a) zu sehen. Im überlagerten Wärmebild (Abb. 10.42 (b)) wurde diese zur besseren Kenntlichmachung weiß markiert. Somit kann der Verzögerungsabstand besser eingeschätzt werden. Der Abstand der Verzögerung wird durch die aktuelle Lage des Lasers und der Maximaltemperatur an der Oberfläche charakterisiert.

Diese Verzögerungsstrecke kann durch eine dünnere Kunststoffplatte bzw. auch durch die Variation der Parameter wie z.B. Laserleistung oder Vorschub minimiert werden.

Die Informationen des Wärmebildes der Oberfläche des Kunststoffes kann nur bedingt für eine Regelung verwendet werden. Bei zeitlicher Betrachtung dieser Verzögerungsstrecke würde dies zu einer großen Dämpfung im System führen. Deshalb sollte vorerst die Temperatur in der Grenzschicht der Verbindung untersucht werden, um einen etwaigen Zusammenhang zwischen den beiden Temperaturen zu finden.

Für die Untersuchung der Temperaturverteilung an der Kunststoffoberfläche werden die Informationen des Wärmebildes verwendet, um daraus Oberflächendiagramme in Matlab zu generieren.

c) Erstellung von Oberflächendiagrammen mit den Messdaten des durch die Wärmebildkamera aufgenommenen Wärmebildes in Matlab

Die dreidimensionalen Darstellungen in den Abbildungen 10.43, 10.44, 10.46, 10.47 und 10.51 - 10.54 wurden durch ein Skript in Matlab generiert.

Dabei wurden die Temperaturinformationen des Wärmebildes als CSV-Datei exportiert (FLIR Tools-Software), um auf die Temperaturwerte zugreifen zu können. Das aufgenommene Wärmebild der Infrarotkamera ist nichts anderes als ein Rasterbild, bei dem jedem Pixel ein Temperaturwert zugeordnet ist.

Diese Werte sind in der CSV-Datei als Matrix dargestellt. Für die Visualisierung wurden nur jene Werte verwendet, die den Bereich der Verbindung beschreiben (Randbedingungen). In Matlab konnte nun die Matrix des Wärmebildes durch diese Randbedingungen als verkleinerte neue Matrix importiert werden.

Da die Position der Wärmebildkamera nicht verändert wurde, waren die Randbedingungen für alle getätigten Aufnahmen die gleichen. Die verkleinerte Matrix konnte nun in Matlab als Oberfläche in einem Diagramm dargestellt werden.

Die Beschriftung der Achsen entlang der Kunststoffoberfläche entspricht der Anzahl der Rasterpunkte, die vertikale Achse dem aufgenommenen Temperaturwert.

In den Abbildungen 10.43 und 10.44 ist der Verlauf der Temperatur dreidimensional dargestellt. Dabei ist eine unterschiedliche Änderung der Temperatur für die verschiedenen Bereiche der Naht ersichtlich. Der Temperaturgradient zeigt diese Änderung der Temperatur und gibt Anhaltspunkte über das lokale Abkühlverhalten des Kunststoffes an seiner Oberfläche. Des Weiteren kommt es in der Mittelebene der Naht zu einer Wärmekonzentration und abhängig vom seitlichen Abstand zur Mittelebene ist eine Abnahme der Wärmeenergie zu beobachten.

Die in den Abbildungen 10.43 und 10.44 ersichtlichen Temperaturverteilungen sind bei 120 W Laserleistung an der Endposition (E) der Verbindung gemessen worden. Diese wurde bei einer mit Glasperlengranulat gestrahlten Titanoberfläche ($Ra=1,48\ \mu\text{m}$) aufgenommen.

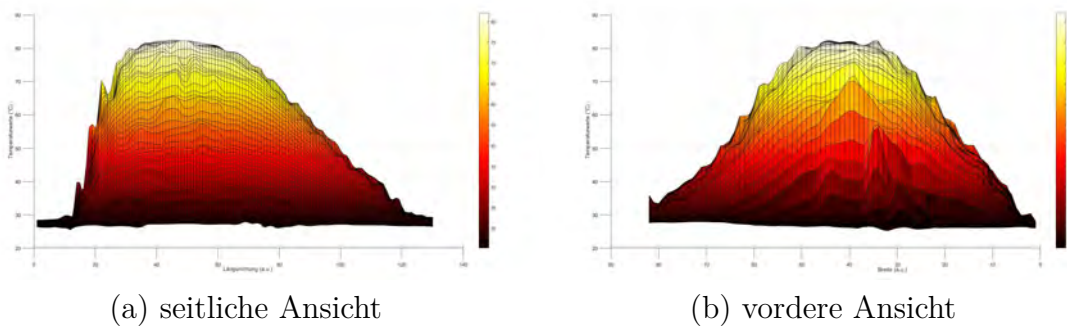


Abbildung 10.43: Grafische Darstellung der Temperaturverteilung an der Kunststoffoberfläche als Vorder- und Seitenansicht der Verbindung - Titanoberfläche: gestrahlt mit Glasperlengranulat, bei 120 W Laserleistung

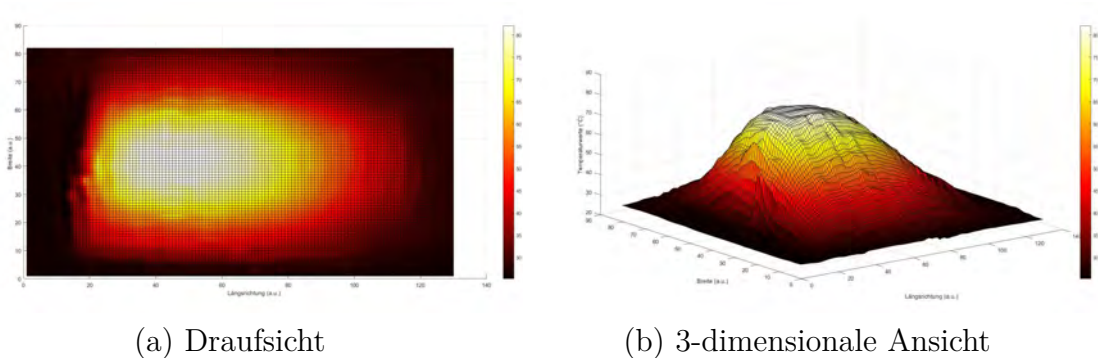


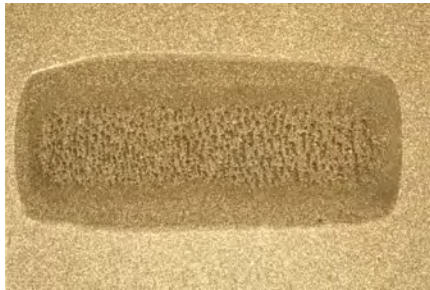
Abbildung 10.44: Grafische Darstellung der Temperaturverteilung an der Kunststoffoberfläche als Draufsicht und 3D-Ansicht der Verbindung - Titanoberfläche: gestrahlt mit Glasperlengranulat, bei 120 W Laserleistung

Diskussion

Bei den Abbildungen 10.43 und 10.44 für den thermischen Verlauf ist die Temperatur in Falschfarben dargestellt. Die Farbe „Dunkelrot“ entspricht dabei einer niedrigeren Temperatur, die Farbe „Weiß“ der höchsten vorliegenden Temperatur. Die seitliche Ansicht ist so positioniert, dass der Beginn der Verbindung auf der linken Seite startet. Die Einheiten der Längsrichtung und der Breite der Verbindung sind nicht auf die Längeneinheit skaliert. Bei der Längsrichtung entsprechen die angegebenen 120 a.u. (a.u. - „arbitrary unit“, willkürlich gewählte Einheit) rund 30 mm. Die Breite mit 80 a.u. rund 20 mm. Die Messwerte der Temperatur sind in °C angegeben. Die Grafiken zeigen die Wärmeverteilung an der Kunststoffoberfläche bei Verbindungsherstellung. Am Beginn der Naht ist ein starker Anstieg der Temperatur zu erkennen. Grund dafür ist die Wartezeit des Lasers zu Beginn des Bearbeitungsprozesses. Des Weiteren befindet sich diese Stelle in der Randzone des Materials, was natürlich durch die geringere Wärmeleitung den Temperaturanstieg zusätzlich beschleunigt.

d) Verteilung der Bläschen

Durch die gespeicherte Wärmeenergie im Kunststoff ist es den Bläschen möglich, in ihrem Durchmesser zu wachsen und die örtliche Lage zu verändern. Zusammenfassend kann dies als Dynamik der Bläschen beschrieben werden. Je wärmer die Phase des Kunststoffes, desto besser sind die Grundvoraussetzungen für das Entstehen von Bläschen.



(a) geringe Leistung: 110 W



(b) höhere Leistung: 130 W

Abbildung 10.45: Verteilung der Bläschen bei unterschiedlich eingestellter Laserleistung - Titanoberfläche gestrahlt mit Glasperlengranulat

Im Zusammenspiel mit dem Abkühlverhalten des Kunststoffes lässt sich die typische Verteilung der Bläschen beschreiben. In Abbildung 10.45 ist die Bläschenverteilung für unterschiedlich eingestellte Laserleistung ersichtlich.

Diskussion

In Abbildung 10.45 erkennt man eine leichte Bogenform bei der Anordnung der Bläschen. Bei Leistungssteigerung kommt es zu einer Verstärkung dieser bogenförmigen Anordnung und auch zusätzlich zu einer vermehrten Bläschenentstehung in der Mittelebene der Naht. Dort ist, wie in Abbildung 10.42-(b) ersichtlich, die Temperatur am höchsten.

Die Bewegung der Bläschen kann durch die Temperaturverteilung und das Abkühlverhalten erklärt werden. Wenn der Laserspot an einer beliebigen Lage betrachtet wird, dann ist die maximale Temperatur in der schon vom Laser bestrahlten Zone, also an der rückwärtigen Zone. Bläschen die direkt hinter dem Laserspot entstehen, können sich in entgegengesetzter Verfahrungsrichtung des Laserspots so lange bewegen bzw. an Größe zunehmen, bis dies von der Temperatur nicht mehr möglich ist. Je höher die Temperatur im Kunststoff und je kleiner der Temperaturgradient, desto besser die Bewegungsmöglichkeiten der Bläschen. Mit zunehmender seitlicher Entfernung von der Mittelebene der Naht, werden die Bewegungsmöglichkeiten der Bläschen eingeschränkt. Aufgrund dessen entstehen kleinere Bläschen und schlussendlich die Bogenform der Bläschenverteilung.

Zusammenfassend ist in der Mitte der Naht, verglichen mit den seitlich von der Mitte liegenden Zonen, die mögliche Bläschendynamik maximal, weil die Temperatur im

Kunststoff am größten bzw. der Temperaturgradient am kleinsten ist. Dies ist auch der Grund dafür, warum es zu einer mittigen Ausbildung des Dampfkanals kommt. Man erkennt auch sehr gut, wie in Abbildung 10.45 die Bläschengröße und -entstehung von der Leistung abhängt. Mehr Leistung bedeutet mehr Temperatur und erhöht somit die Dynamik der Bläschen.

e) Temperaturverteilung an der Kunststoffoberfläche bei Vorschubbewegung des Lasers

Um zu veranschaulichen, wie sich die Temperatur an der Kunststoffoberfläche bei Vorschubbewegungen des Lasers verhält, wurden während des Fügevorganges Aufnahmen getätigt. Am Anfang, in der Mittelposition, am Ende der Verbindung und nach dem Ausschalten des Lasers wurden Informationen hinsichtlich der Temperaturverteilung gesammelt. In den Abbildungen 10.46 und 10.47 ist das thermische Verhalten an den vorher genannten Positionen grafisch dargestellt.

Werden die Abbildungen 10.46 und 10.47 überlagert betrachtet, stellt man fest, dass sich die Temperatur am Beginn erst bei der Mittelposition des Lasers (Position M) der maximalen Oberflächentemperatur annähert. Bei erreichter Endposition (E) des Lasers ist eine relativ konstante Temperaturverteilung entlang der schon bestrahlten Länge der Verbindungsnaht ersichtlich. Erst nach Beendigung des Bearbeitungsvorganges (Abb. 10.47-(N)) sinkt die Temperatur, ausgehend von der Anfangsposition (B) in Vorschubrichtung und die maximale Oberflächentemperatur des Kunststoffes wandert nach und nach zum Ende der Naht.

Die Ausbildung der Temperaturverteilung hängt unter anderem auch von der Form des Intensitätsprofils des Laserstrahls ab. In der Mitte, entlang der Verbindung, ist die Temperatur am höchsten, sprich die Intensität des Strahlenprofils ist maximal.

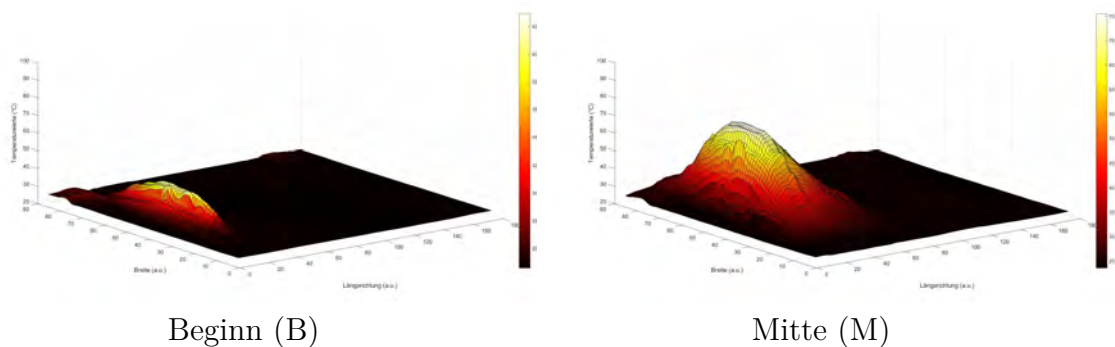


Abbildung 10.46: Grafische Darstellung des Temperaturverlaufes an der Kunststoffoberfläche am Beginn (B) bzw. Mitte (M) der Bearbeitung bei 120 W - Titanoberfläche gestrahlt mit Glasperlengranulat $Ra=1,48\ \mu\text{m}$

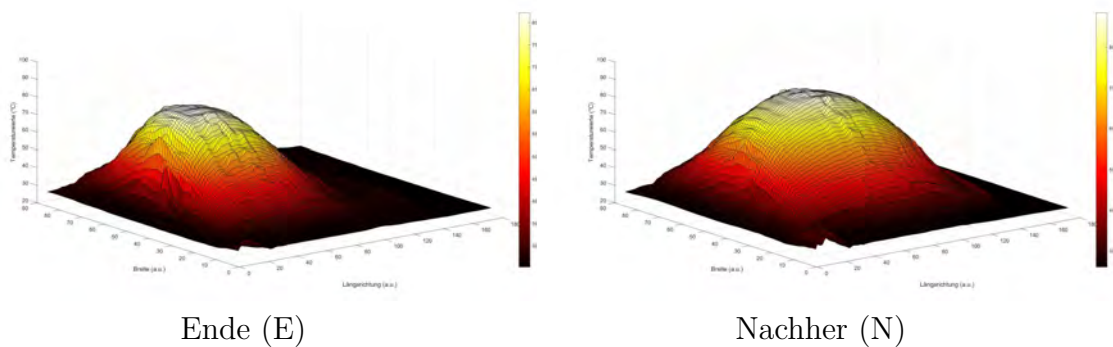


Abbildung 10.47: Grafische Darstellung des Temperaturverlaufes an der Kunststoffoberfläche am Ende (E) bzw. nach (N) der Bearbeitung bei 120 W - Titanoberfläche gestrahlt mit Glasperlengranulat $Ra=1,48\ \mu\text{m}$

Um die Temperaturverteilung homogener zu gestalten, müsste das Intensitätsprofil des Laserspots an den Randgebieten angepasst werden. Es ist auch möglich, damit die Bläschendynamik zu beeinflussen.

10.3.5 Messung der Grenzflächentemperatur

Bei der Messung der Grenzflächentemperatur wurden Thermoelemente verwendet. Wie bereits erwähnt entfällt damit, im Gegensatz zu einer Messung mit einem Pyrometer, die Bestimmung des Emissionsgrades an der Titanoberfläche.

Bei den Thermoelementen wird auf den Typ K zurückgegriffen. Dieses Element ist für einen Temperaturbereich von $-200\ ^\circ\text{C}$ - $1250\ ^\circ\text{C}$ geeignet. Da bei dieser Arbeit ein Temperaturbereich von $20\ ^\circ\text{C}$ - $300\ ^\circ\text{C}$ zu erwarten ist, sind die Elemente für diesen Einsatzbereich geeignet. Das Referenzdatenblatt für Thermoelemente des Typ K ist im Kapitel 12.5 des Anhangs ersichtlich.

Ein Thermoelement besteht prinzipiell aus zwei Drähten verschiedenen Materials, die an der Messstelle miteinander verschweißt bzw. verdrillt werden. Wichtig ist dabei, dass es zu einem Kontakt zwischen den beiden Drähten kommt, damit der Stromkreis geschlossen ist. Bei gegebener Temperaturdifferenz zwischen der Messstelle und der Vergleichsstelle baut sich eine Thermospannung auf, die sehr kleine Ströme fließen lässt. Diese Spannungssignale werden gemessen und mithilfe einer Vergleichsstelle (Vergleichstemperatur bekannt) auf die Temperatur an der Messstelle rückgeschlossen. In dieser Arbeit kommt eine Verstärkerschaltung zum Einsatz, die dies bereits berücksichtigt.

a) Überprüfen der Temperaturmessschaltung

Vor den eigentlichen Versuchen wurde die korrekte Funktionsweise der Messschaltung kontrolliert. Dabei wurden die drei im Messsystem verwendeten Thermoelemente in kochendes Wasser gehalten. Die dabei entstehenden Signale der Ausgangsspannung müssen einen annähernd gleichen Wert anzeigen, wobei diese nahezu $100\ ^\circ\text{C}$ entsprechen sollten.

In Abbildung 10.48 sind alle drei Spannungssignale dargestellt. Die gemessene Schwingungsbreite ist für unseren Einsatz ausreichend, somit kann diese Schaltung für die weiteren Untersuchungen der Grenzflächentemperatur verwendet werden.

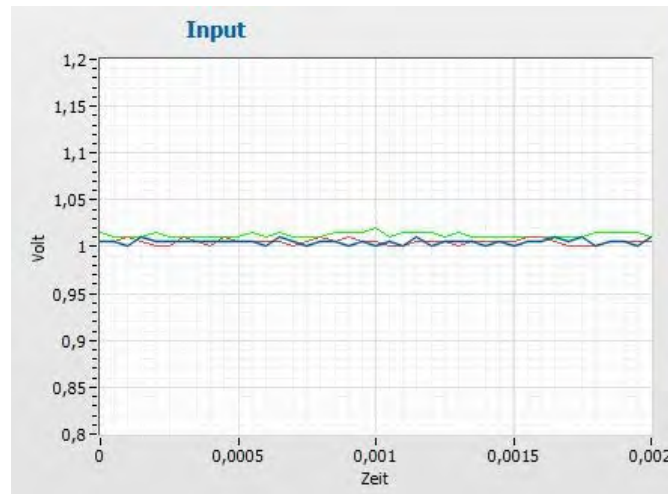


Abbildung 10.48: Gemessene Spannungssignale der drei Thermoelemente in kochendem Wasser

b) Gemessener Temperaturverlauf an der Grenzschicht während des Verbindungsprozesses

Der Temperaturverlauf in der Grenzschicht wird sich abhängig von den verschiedenen Positionen der unterschiedlichen Messpunkte jeweils etwas anders verhalten. Ein wesentlicher Grund ist die veränderliche Wärmeabgabe aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen entlang der Verbindung (Randzonen der Probe - Mitte der Probe). Sichtbar wird dies am Anstieg des Spannungssignales der verschiedenen Kurven. In Abbildung 10.49 sind die Spannungsverläufe der Thermoelemente grafisch dargestellt.

Die in Abbildung 10.49 ersichtlichen Spannungsverläufe verhalten sich mit dem Temperaturverlauf proportional. Bei diesem Versuch wurde eine mit Glasperlen gestrahlte Oberfläche ($R_a = 1,48 \mu\text{m}$) verwendet. Der Verbindungsprozess wurde mit einer Laserleistung von 120 W durchgeführt.

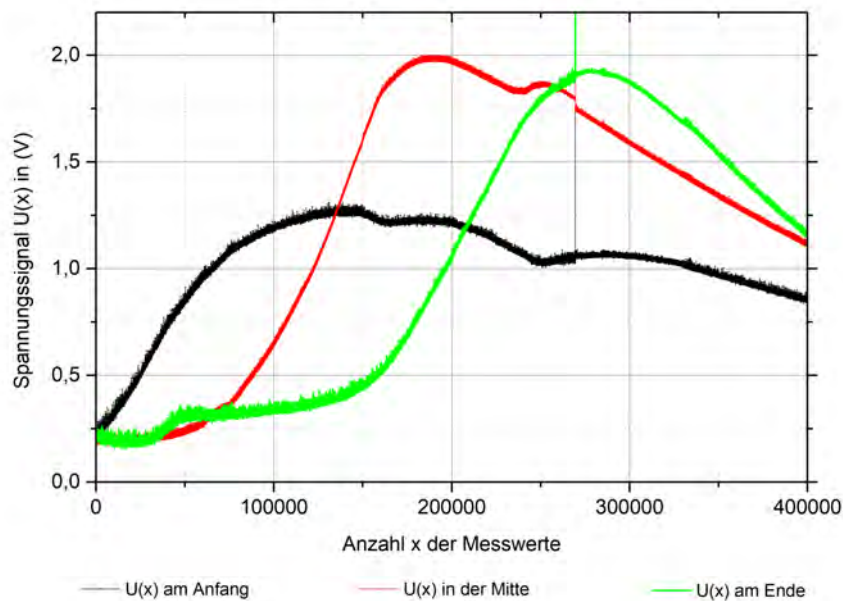


Abbildung 10.49: Darstellung der gemessenen Spannungsverläufe an den unterschiedlichen Nahtpositionen der Thermoelemente bei 120 W in der Grenzschicht der Verbindung

Diskussion

Bei den Spannungsverläufen an den drei unterschiedlichen Positionen lässt sich erkennen, dass die Steigungen für die Signale der Thermoelemente am Anfang und Ende der Probe etwas flacher verlaufen als die in der Mitte. Der ausgegebene Spannungsverlauf des Thermoelementes in der Mitte ist am steilsten und gibt auch das höchste Spannungssignal aus. Dieses ist laut Messwerttabelle 1,9837 Volt, entspricht also 198 °C. Hier tritt die höchste aufgenommene Temperatur auf.

Weiters kann man einen kleinen Anstieg der Temperatur am Beginn des Verlaufes für das Thermoelement am Ende (grüner Verlauf) erkennen. Einfluss darauf hat die Wartezeit des Lasers. Danach steigt die Temperatur nur geringfügig. Gleichzeitig kommt es aber am Sensor in der Mittelposition (roter Verlauf) zu einer starken Temperaturerhöhung. Erst wenn der Laser den Bereich der Probenmitte erreicht hat, beginnt auch der Sensor am Ende der Verbindung, auszuschlagen.

Vermutlich wird der Wärmefluss durch die Thermoelemente bzw. durch die Bohrungen gestört. Betrachtet man den Verlauf für den Anfangssensor (schwarz), sind zwei kleine Knicke erkennbar. Projiziert auf die oberhalb liegenden Verläufe (Mittelsensor (rot) und Endsensor (grün)), liegen diese Knicke jeweils vor dem Peak der Sensoren. Deshalb wird vermutet, dass diese Knicke auf die Lage der Bohrungen hinweisen.

c) Gemessene Temperaturwerte an der Grenzschicht

Für jede Probe wurden jeweils die Temperaturwerte gemessen und in tabellarischer Form aufgelistet. Des Weiteren wurden die Maximal- und die Durchschnittstempera-

tur der Proben ermittelt.

In Tabelle 10.13 sind die Messwerte der Verbindungen gelistet.

Gemessene Temperaturwerte an der Grenzschicht					
Probe	T_B	T_M	T_E	T_{MAX}	T_{\emptyset}
	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$
Glasperlengranulat Ra=1,48 μ m					
g-90-1,5	116,0	127,5	138,5	139,0	127,3
g-100-1,5	134,5	135,5	178,5	178,5	149,5
g-110-1,5	117,5	161,0	177,0	181,0	151,8
g-120-1,3	162,5	172,5	172,0	194,5	169,0
g-130-1,25	162,0	174,0	185,0	196,0	173,7
g-140-1,2	136,0	216,3	220,0	233,0	190,8
g-160-1,2	151,5	231,0	197,0	231,0	193,2
g-170-1	262,0	200,0	208,0	262,0	223,3
g-180-1	179,3	275,0	266,0	303,3	239,8
g-200-1	189,5	297,0	268,5	297,0	251,6

Tabelle 10.13: Gemessene Temperaturwerte an der Grenzschicht für glasperlengestrahlte Titanoberflächen

In Tabelle 10.13 erkennt man eine stetige Zunahme der Durchschnittstemperatur. Laut den Messergebnissen der Maximaltemperatur im Leistungsbereich von 100 - 130 W ist zu erkennen, dass es in diesem Bereich nur zu einem leichten Anstieg der Temperatur kommt.

Übersteigt die Maximaltemperatur die Zersetzungstemperatur des Kunststoffes von 280 $^{\circ}C$, dann kommt man in den Bereich für die Bildung des Dampfpolsters und die mechanische Festigkeit nimmt dramatisch ab.

In Abbildung 10.50 sind alle akkumulierten Messwerte wie Zugfestigkeit, Erhebung, Oberflächentemperatur und Grenzflächentemperatur für glasperlengestrahlte Probeoberflächen zusammengefasst und die Verläufe grafisch eingezeichnet. Die alleinige Verwendung und die Auswahl dieses Oberflächentyps für die Messung der Grenzflächentemperatur beruht darauf, dass die thermischen Eigenschaften des Kunststoffes nicht vom Mittenrauwert der Titanoberfläche abhängig sind (siehe auch Unterpunkt 10.3.4). Für den Vergleich der Festigkeit ist der Mittenrauwert sehr wohl von Bedeutung, worauf aber in Abb. 10.50 nicht eingegangen wurde.

Die Grenzlinie mit der Abkürzung ZT steht dabei für die Zersetzungstemperatur des Kunststoffes.

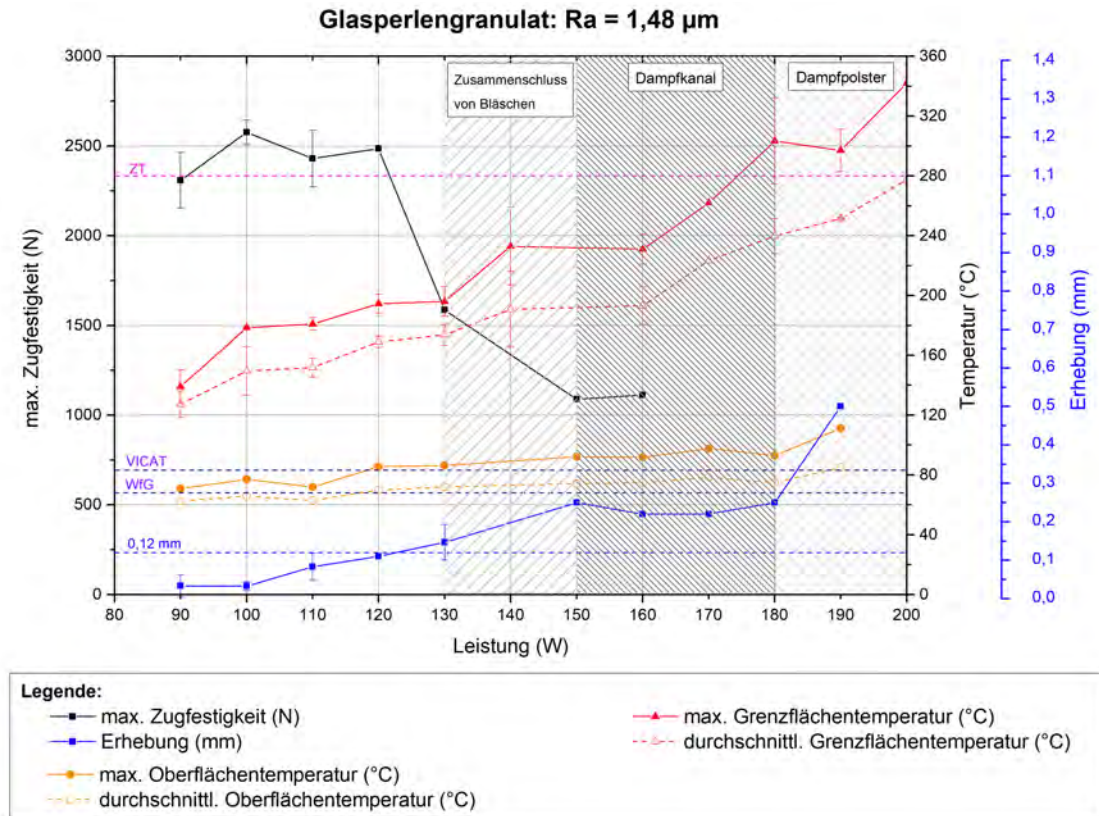


Abbildung 10.50: Zusammenfassende darstellung der Verlaufskurven für glasperlengestrahlte Oberflächen: Zugfestigkeit, Erhebung, Oberflächen- und Grenzflächentemperatur

Interpretation

In Abbildung 10.50 ist am Verlauf der Zugfestigkeit ersichtlich, wie sich die unterschiedlichen Temperaturen an der Grenzschicht und an der Kunststoffoberfläche bei veränderlichen Laserleistungen verhalten.

Durch die in Abbildung 10.41 getroffenen Annahmen kann ein Leistungslimit eingeführt werden, bis zu welchem optimale Eigenschaften der Festigkeit vorliegen. Zu den Annahmen zählen die zulässige Erhebung im Bereich von 0,12 mm und des Nichtüberschreitens einerseits der VICAT-Temperatur für die maximale Oberflächentemperatur T_{Max} und andererseits der Warmfestigkeitsgrenze (WfG) für die Durchschnittstemperatur T_{\ominus} .

Das dadurch entstehende Leistungslimit liegt bei ungefähr 120 W und ergibt ein Leistungsfenster von 90 - 120 W.

Für die Temperatur an der Grenzfläche bedeutet dies ein Limit der Maximal- und der Durchschnittstemperatur, bis zu welchem die Festigkeitseigenschaften ihr Optimum aufweisen werden. Die zulässige Maximaltemperatur in der Grenzschicht liegt, definiert durch das Leistungsfenster, bei 200 °C. Wenn man aber den weiteren Verlauf größer 120 W betrachtet, kommt es bei dieser Temperatur schon zum Zusammenschluss der Bläschen. Für ein Erreichen eines Optimums in der Zugfestigkeit gilt es, dies wei-

testgehend zu vermeiden.

Da der Messpunkt bei 120 W für die Maximaltemperatur im Bereich der 200 °C liegt, wird das Temperaturlimit auf 185 °C abgesenkt. Für die Durchschnittstemperatur in der Grenzschicht bedeutet dies eine Grenztemperatur von 170 °C. Das Leistungsfenster wird somit durch 90 - 115 W neu definiert. An den in Abb. 10.41 getroffenen Annahmen würde sich nichts ändern.

Der Temperaturbereich des Kunststoffes für die Plattenverformung wird im Datenblatt mit 120 - 160 °C angegeben. Bei optimaler Zugfestigkeit liegt die Maximaltemperatur an der Grenzschicht im Bereich von 180 °C. Diese Temperatur liegt über dem zulässigen Bereich für die Plattenverformung, deshalb ist auch eine Eigenschaftsänderung des Kunststoffes nicht auszuschließen.

Beim Betrachten des Verlaufes für die Maximaltemperatur in der Grenzschicht erkennt man auch, dass es ab ca. 220 °C zur Bildung eines Dampfkanals kommt. Dieser Kanal breitet sich bei weiterer Temperatursteigerung aus, was schlussendlich zur Entstehung eines Dampfpolsters führt. Liegt die Temperatur in der Nähe der Zersetzungstemperatur (ZT) des Kunststoffes, kommt es zur Ausbildung eines Dampfpolsters und lässt somit die Temperatur stark ansteigen.

Ursache für den starken Temperaturanstieg ist die unterschiedliche Wärmeleitung des im Dampfpolster befindlichen Gases verglichen mit dem Kunststoff.

Durch den Dampfpolster entsteht eine Gasschicht zwischen den beiden Materialien. Diese Schicht isoliert aufgrund der geringeren Wärmeleitfähigkeit etwas stärker als der Kunststoff selbst. Deshalb kommt es zu einem Wärmestau, der nicht rasch genug in den Kunststoff abgegeben werden kann.

Die Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffes wird mit $0,2 \frac{W}{m \cdot K}$ angegeben, die von Luft mit nur $0,024 \frac{W}{m \cdot K}$ [6].

Bei den Annahmen eines 0,75 mm hohen Dampfpolsters zwischen der Kunststoff-Titan Verbindung und einer vorliegenden Temperatur von 280 °C, würde sich der Wärmefluss durch die Gasschicht um 88 % verringern. Es kann also nur eine geringere Menge an Wärme in Richtung Kunststoff abgegeben werden, somit auch der verstärkte Temperaturanstieg in der Grenzschicht.

Bei der Berechnung des Wärmeflusses wurde mit der Grundformel,

$$\dot{Q} = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta\theta}{l} \quad (10.2)$$

gearbeitet [2].

λ steht dabei für den Wärmeleitkoeffizient in $\frac{W}{m \cdot K}$, A für die Querschnittsfläche, $\Delta\theta$ für die Temperaturdifferenz und l für die Schichtdicke.

In unserem Fall ist die Querschnittsfläche durch die Breite und Länge des Dampfpolsters definiert. Die Schichtdicke ist dabei seine Höhe. Für die Unterscheidung der beiden Zustände wird der jeweilige Wärmeleitkoeffizient verwendet und die beiden Ergebnisse ins Verhältnis gebracht.

d) Temperaturverteilung an der Titanoberfläche

Dieses Experiment wurde ohne Kunststoffauflage durchgeführt, um genauere Erkenntnisse über den Temperaturverlauf an der Grenzschicht zu bekommen. Im Gegensatz zur Temperaturverteilung an der Kunststoffoberfläche (siehe Abb. 10.43), ist an der Titanoberfläche eine deutlich bessere Wärmeleitung erkennbar. Trotz der Aufnahme nach der Position (M), ist in Abbildung 10.51-(a) ein starker Abfall rund um die Energieeinbringung festzustellen.

Weil der Emissionsgrad für Titan stark von der Oberflächenrauigkeit abhängt und dieser nur schwer bestimmbar ist, wird in den Abbildungen 10.51 - 10.54 für die vertikalen Achsen der Temperaturwerte „a.u.“ als Einheit gewählt. Für die Erfassung der Temperaturverhältnisse durch das Wärmebild der Infrarotkamera spielt der Emissionsgrad jedoch keine Rolle.

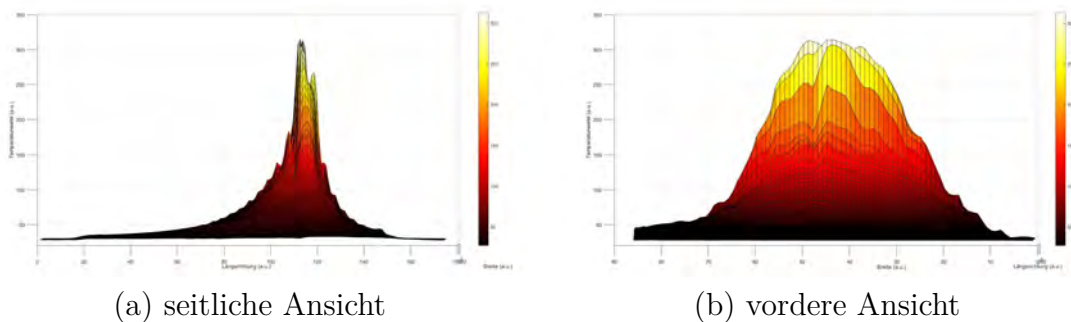


Abbildung 10.51: Grafische Darstellung der Temperaturverteilung an der Titanoberfläche von Seiten- und Vorderansicht bei Bestrahlung mit 120 W - Titanoberfläche gestrahlt mit Glasperlengranulat

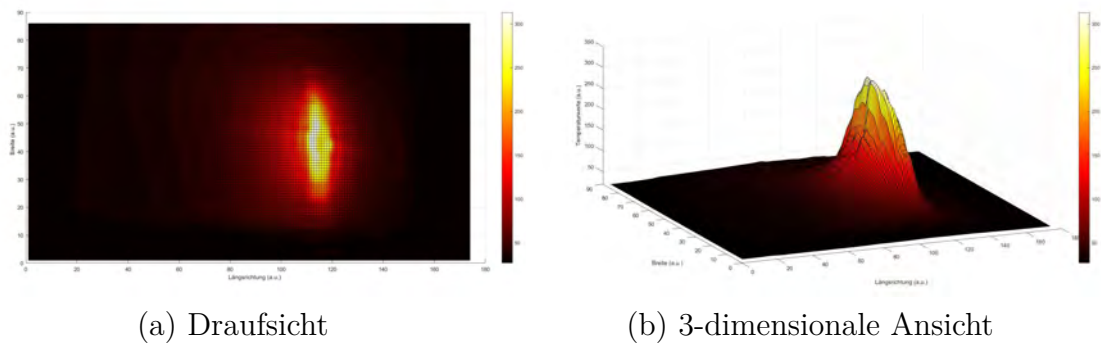


Abbildung 10.52: Grafische Darstellung der Temperaturwerte an der Titanoberfläche von Draufsicht und 3D-Ansicht der Verbindung bei Bestrahlung mit 120 W - Titanoberfläche gestrahlt mit Glasperlengranulat

Die Temperaturgradienten der Abbildungen 10.51 und 10.52 sind stärker ausgeprägt als die, die in den Abbildungen 10.43 und 10.44 ersichtlich sind. Ursache ist die bessere

Wärmeleitfähigkeit des Titans gegenüber dem Kunststoff. Vor allem bei der Darstellung der seitlichen Ansicht der Temperaturentwicklung (Abb. 10.51-(a)) erkennt man einen gravierenden Unterschied des Temperaturanstiegs am Beginn und am Ende der Verteilung, wenn man dies mit der Abbildung 10.43(a) vergleicht.

Das visuelle Erscheinungsbild zeigt außerdem, dass die Wärmeeinbringung an der Oberfläche des Titans der Geometrie des Laserspots sehr ähnlich ist. Dies ist wiederum durch die höhere Wärmeleitfähigkeit des Titans erklärbar. Die Temperatureinbringung ist linienförmig konzentriert. Unter anderem können Anhaltspunkte für die Intensitätsverteilung des Laserspots gewonnen werden.

e) Temperaturverteilung an der Titanoberfläche bei Vorschubbewegung des Lasers

Um zu veranschaulichen, wie sich der Temperaturverlauf bei Vorschubbewegung des Lasers verändert, wurden, wie schon im Kapitel der Oberflächenmessung des Kunststoffes, Aufnahmen an unterschiedlichen Positionen getätigt. In den Abbildungen 10.53 und 10.54 ist das thermische Verhalten bei Vorschubbewegung dargestellt.

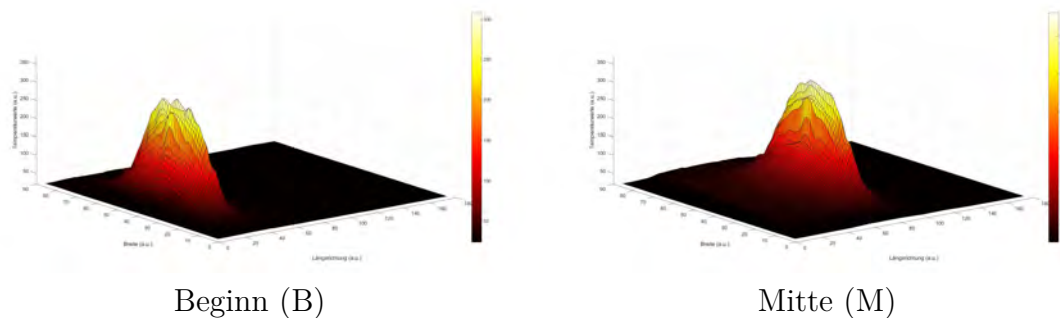


Abbildung 10.53: Grafische Darstellung des Temperaturverlaufes an der Titanoberfläche am Beginn (B) und Mitte (M) der Titanprobe bei Bestrahlung mit 120 W - Titanoberfläche gestrahlt mit Glasperlengranulat

Zusammenfassend ist in den Abbildungen 10.53 und 10.54 ersichtlich, dass die Wärmeeinbringung durch den Laser linienförmig vonstattengeht und es zu minimaler Temperaturerhöhung in den umliegenden Bereichen kommt. Ist der Laser ausgeschaltet, fällt die Temperatur schlagartig ab (siehe Position (N) in Abb. 10.54).

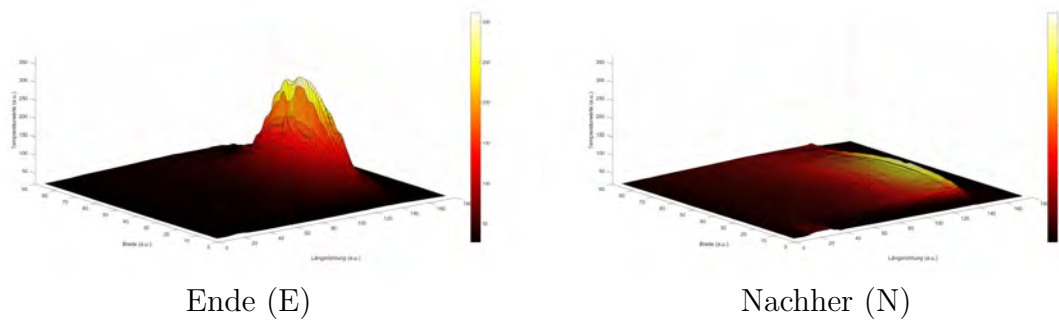


Abbildung 10.54: Grafische Darstellung des Temperaturverlaufes an der Titanoberfläche am Ende (E) und nach der Bestrahlung (N) der Titanprobe mit 120 W - Titanoberfläche gestrahlt mit Glasperlengranulat

f) Vergleich der Grenzflächentemperatur mit und ohne Kunststoff bei 120 W

Befindet sich der Kunststoff auf der Titanprobe, ist bei Betrachtung von Abb. 10.49 ein geringerer Temperaturgradient an der Grenzfläche feststellbar als ohne (Abb. 10.51). Dies wird durch einen Vergleich zwischen den Position (M) und (E) für die Temperaturänderung der Abb. 10.54 durch das Wärmebild und Abb. 10.49 durch die Thermoelementmessungen ersichtlich.

Die Lage der Maximaltemperatur an der Grenzschicht ohne Kunststoff (siehe Abb. 10.53 und 10.54) gibt ungefähr die Position des Laserspots an. Da der Temperaturwert durch die Wärmebildkamera nicht aussagekräftig ist, die Form der Verteilung allerdings schon, wird die relative Temperaturabnahme zwischen den Positionen (M) und (E) angegeben.

Dabei werden die Grenzschichttemperaturen an den beiden Positionen jeweils mit und ohne Kunststoff gemessen und ins Verhältnis gesetzt.

Bei genauerer Analyse der Abbildungen 10.49 und 10.54 ist bei der Titanprobe mit Kunststoff lediglich eine relative Temperaturabnahme von ca. 10 % zwischen den zwei Positionen (M) und (E) in der Grenzschicht bestimmbar. Bei jener ohne Kunststoff beträgt die Temperaturreduktion jedoch ca. 80 %. Daraus ist ersichtlich, dass der Kunststoff die abgegebene Wärme des Titans sehr gut entlang der bestrahlten Zone aufnimmt. Für diese Eigenschaft ist die geringe Wärmeleitung des Kunststoffes verantwortlich.

11 Zusammenfassung und Ausblick

Durch die in der Arbeit durchgeführten Messungen konnten Erkenntnisse gewonnen bzw. Prozessfenster definiert werden, welche die Ausbildung optimaler Eigenschaften hinsichtlich Zugfestigkeit der Verbindung zur Folge haben. Durch das LAMP-Verfahren wurde eine belastbare Verbindungsnaht zwischen den beiden Materialien hergestellt.

Die Eigenschaften der Verbindung sind einerseits beeinflussbar durch die Rauigkeit der Titanoberfläche und andererseits durch die Temperaturverhältnisse an der Grenzschicht. Es konnte gezeigt werden, dass die maximale Zugfestigkeit vom Rauigkeitswert der Titanoberfläche abhängt (siehe Abb. 10.38). Globale Maximalwerte stellen sich dann ein, wenn sich der Mittenrauwert der Titanoberfläche im Bereich der Wellenlänge des für die Bearbeitung verwendeten Lasers aufhält.

Die Temperatur hängt von der eingebrachten Leistung des Lasers ab, welche durch Absorption von elektromagnetischer Strahlung an der Titanoberfläche in Wärmeenergie umgewandelt wird.

Des Weiteren konnte durch Messungen der Temperaturverhältnisse an der Kunststoffoberfläche, der Prozess für die Bildung der Bläschen als auch die dadurch entstehende Wölbung oberhalb der Verbindung beschrieben werden (siehe auch Abb. 10.41). Durch die Analyse der Temperaturverteilung an der Kunststoffoberfläche war es außerdem möglich, das Abkühlverhalten der Kunststoffoberfläche und die daraus resultierende Verteilung der Bläschen im Kunststoff zu erklären. Grundlage dafür war der unterschiedliche Verlauf des Temperaturgradienten, der durch grafische Darstellungen der Temperaturverteilung ersichtlich wurde (Abb. 10.43 und 10.44).

Um herauszufinden, ab welcher Temperatur Bläschen entstehen, wurden die Temperaturverhältnisse an der Grenzfläche der Verbindung gemessen. Anhand dieser Temperaturinformation war es schlussendlich möglich, Temperaturbereiche für die verschiedenen Konfigurationen der Bläschen zu bestimmen. Dies waren die Bereiche für den Zusammenschluss der Bläschen bis hin zur Entstehung des Dampfkanals oder auch die Dampfpolsterbildung. Außerdem konnte ein Temperaturbereich für die Ausbildung maximaler Zugfestigkeit eruiert werden.

Die Informationen über die Temperaturbereiche dienen als Grundlage für weitere Untersuchungen im Bereich des Verbindens von Kunststoffen mit Metallen. Insbesondere für Regelungssysteme sind diese akkumulierten Daten von Vorteil. Durch ein Regelungssystem wäre es möglich, während des Verbindungsprozesses Daten in Echtzeit zu erfassen und bei Bedarf die Parameter wie Laserleistung, Vorschub, usw. zu ändern, um optimale Eigenschaften zu erreichen. Dies bedarf jedoch mehr Entwicklungszeit, die den Zeitaufwand dieser Arbeit sprengen würde.

Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] Bozena Arnold. *Werkstofftechnik für Wirtschaftsingenieure*. Springer Vieweg, 2013. ISBN: 978-3-642-36590-4.
- [2] Hans Dieter Baehr und Karl Stephan. *Wärme- und Stoffübertragung*. Springer Berlin Heidelberg, 2016. DOI: 10.1007/978-3-662-49677-0.
- [3] Jean Pierre Bergmann und Martin Stambke. „Potential of Laser-manufactured Polymer-metal hybrid Joints“. In: *Physics Procedia* 39 (2012), S. 84–91. DOI: 10.1016/j.phpro.2012.10.017.
- [4] Alfred Böge und Jürgen Eichler. *Physik für technische Berufe: Physikalisch-technische Grundlagen, Formelsammlung, Versuchsbeschreibungen, Aufgaben mit ausführlichen Lösungen (German Edition)*. Vieweg+Teubner Verlag, 2008. ISBN: 978-3-8348-0342-9.
- [5] Die Chemie-Schule. *Extinktionskoeffizient*. Zugriff: 18.4.2019 - 9:55. URL: <https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Extinktionskoeffizient>.
- [6] Chemie.de. *Wärmeleitfähigkeit*. Zugriff: 19.3.19 - 18:50. URL: <http://www.chemie.de/lexikon/W%C3%A4rmeleitf%C3%A4higkeit.html>.
- [7] Wolfgang Demtröder. *Experimentalphysik 3: Atome, Moleküle und Festkörper (Springer-Lehrbuch) (German Edition)*. Springer, 2010. ISBN: 978-3-642-03910-2.
- [8] Lutz Dorn, Helmut Grutzeck und Seifollah Jafari. *Schweißen und Löten mit Festkörperlaser (German Edition)*. Springer, 1992. ISBN: 3540555439.
- [9] Jürgen Eichler und Hans-Joachim Eichler. *Laser: Bauformen, Strahlführung, Anwendungen (German Edition)*. Springer, 2006. ISBN: 3-540-30149-6.
- [10] Bernhard Frenzel u. a. *Physik Aufgabensammlung : Für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2008. ISBN: 3834895059.
- [11] Christian Gerthsen. *Gerthsen Physik (Springer-Lehrbuch) (German Edition)*. Springer, 2010. ISBN: 978-3-642-12893-6.
- [12] *GRAFIK - Eindringtiefe elektromagnetischer Strahlung in das Auge*. Department of Physics, Zugriff: 5.10.2018 - 10:05. Laser Safety. URL: <https://infosystem.physik.unibas.ch/LaserSafetyCourse/de/3.html>.
- [13] *GRAFIK - Elektromagnetisches Spektrum*. Zugriff: 19.7.2018. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisches_Spektrum.

- [14] *GRAFIK - Schematische Darstellung des LAMP-Verfahrens mit transparenten Kunststoff*. Zugriff: 19.4.2019 - 15:05. URL: <https://www.lpkf.com/de/branchen-technologien/laser-kunststoffschweissen/technologie-schweissverfahren/>.
- [15] *GRAFIK - Übersicht über die Gefährdungspotentiale in den einzelnen Laserklassen*. Zugriff: 5.10.2018 - 10:43. eval.at - Lasersicherheit in der Ausbildung. URL: <https://www.eval.at/lasa---laser-sicherheit-in-der-ausbildung/kapitel-1---laser-allgemein/1-6-laserklassen>.
- [16] Heinz Herwig und Andreas Moschallski. *Wärmeübertragung : Physikalische Grundlagen – Illustrierende Beispiele – Übungsaufgaben mit Musterlösungen*. ger. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2009. ISBN: 3834899666.
- [17] Bernhard Ilchner und Robert F. Singer. *Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik: Eigenschaften, Vorgänge, Technologien (Springer-Lehrbuch) (German Edition)*. Springer, 2010. ISBN: 978-3-642-01733-9.
- [18] Peter Jany u. a. *Thermodynamik für Ingenieure : Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Studium*. 6., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2006. ISBN: 3834890006.
- [19] *Joining of Polymer-Metal Hybrid Structures: Principles and Applications*. JOHN WILEY & SONS INC, 6. Feb. 2018. 416 S. ISBN: 1118177630.
- [20] S KATAYAMA und Y KAWAHITO. „Laser direct joining of metal and plastic“. In: *Scripta Materialia* 59.12 (Dez. 2008), S. 1247–1250. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2008.08.026.
- [21] Yousuke Kawahito, Yusuke Niwa und Seiji Katayama. „Laser direct joining between stainless steel and polyethylene terephthalate plastic and reliability evaluation of joints“. In: *Welding International* 28.2 (Okt. 2012), S. 107–113. DOI: 10.1080/09507116.2012.715883.
- [22] Wilfried König. *Fertigungsverfahren 1: Drehen, Fräsen, Bohren (VDI-Buch) (German Edition)*. Springer, 2008. ISBN: 978-3-540-23458-6.
- [23] Martin Löffler-Mang. *Optische Sensorik*. Vieweg+Teubner Verlag, 29. Dez. 2011. ISBN: 3834814490.
- [24] J. Martan u. a. „Analysis of short wavelength infrared radiation during laser welding of plastics“. In: *Applied Optics* 57.18 (Mai 2018), S. D145. DOI: 10.1364/ao.57.00d145.
- [25] Polymer Service GmbH Merseburg. *Vicat-Erweichungstemperatur*. Zugriff: 17.4.2019 - 17:30. URL: <https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Vicat-Erweichungstemperatur>.
- [26] Polymer Service GmbH Merseburg. *Warmformbeständigkeit*. Zugriff: 17.4.2019 - 18:05. URL: <https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/W%C3%A4rmeformbest%C3%A4ndigkeitstemperatur>.

- [27] novasens-Sensortechnik. *Emissionsgradtabelle für die Infrarot Temperaturmessung*. Zugriff: 6.3.2019 - 11:42. novasens Sensortechnik Heuer. URL: <https://www.novasens.de/wp-content/uploads/Emissionsgradtabellenovasens.pdf>.
- [28] Univ. Prof. Dipl.-Phys. Dr.-Ing Andreas Otto. „Lasersystemtechnik“. Vorlesungsunterlagen.
- [29] Reinhart Poprawe. *Lasertechnik für die Fertigung*. Springer-Verlag GmbH, 19. Okt. 2004. ISBN: 3540214062.
- [30] SIMONA. *Verarbeitungshinweise für Kunststoffe*. Zugriff: 18.12.2018 - 12:44. URL: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=17&ved=2ahUKEwjz4ezJzv_gAhWyzoUKHZVsBjcQFjAQegQIChAB&url=http%3A%2F%2Fsimona-de.com%2Fstatic%2Fsites%2Fdefault%2Fde%2Fassets%2FInformationsmaterial%2Fdeutsch%2FVerarbeitung%2FPI_Vakuum_d.pdf&usq=A0vVaw39WR4R_W0yvzZyqOMXxq4-.
- [31] Rath Stefan. „Konzeptionierung eines Laserbearbeitungskopfes für einen Diodenlaser“. In: *Projektarbeit - TU Wien* (Juli 2018).
- [32] PEWA Group / testo. *Leitfaden zur Infrarot-Messtechnik*. Zugriff: 17.4.2019 - 18:00. PEWA Messtechnik GmbH. URL: http://www.pewa.de/DATENBLATT/DBL_TESTO_INFRAROTMESSTECHNIK_FACHAUFSATZ_DEUTSCH.pdf.
- [33] Tractus3D. *3D-Drucken mit PET-G*. Zugriff: 2.5.2019 - 11:05. URL: <https://tractus3d.com/de/3d-druckmaterialien/3d-drucken-mit-petg/>.
- [34] Hongze Wang, Yosuke Kawahito und Nishimoto Koji. „A Laser Joining System For Titanium and Polyethylene Terephthalate Plastic Controlled by Multiple Signal Sources“. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* (2018), S. 1–1. DOI: 10.1109/tie.2018.2831190.

Abbildungsverzeichnis

5.1	Elektromagnetisches Spektrum - Sichtbarer Bereich für das menschliche Auge [13]	1
5.2	Aufbauprinzip eines Lasers [7, S. 271]	2
5.3	Darstellung von Absorption und Emission der Atome [9, S. 30]	3
5.4	(a) Vereinfachter schematischer Aufbau eines Halbleiterlasers; (b) Energieniveauschema [7, S. 285]	7
5.5	Darstellung der verschiedenen Potentiale von p- und n-Dotierung, E_g ... Bandlückenenergie, F_c bzw. F_v ... Fermienergie, LB ... Leitungsband, VB ... Valenzband [9, S. 180]	7
5.6	Abgestrahlte optische Leistung einer Laserdiode als Funktion des Anregungsstromes [23, S. 119]	8
5.7	Spektrum unterhalb (LED) und oberhalb (Laserdiode) des Schwellwertes [23, S. 119]	8
5.8	Räumliche Abstrahlung einer Laserdiode [23, S. 120]	9
5.9	Darstellung der verschiedenen Eindringtiefen elektromagnetischer Strahlung in das Auge [12]	10
5.10	Übersicht der Gefährdungspotentiale in den einzelnen Laserklassen [15]	13
5.11	Darstellung der spektralen spezifischen Ausstrahlung des Schwarzen Körpers nach dem Planck'schen Gesetz [2, S. 644]	15
5.12	Darstellung von Emissionsgraden technischer Oberflächen [18, S. 317] .	17
6.1	Darstellung des eigens konstruierten Laserbearbeitungskopfes, montiert an einem Roboterarm von ABB	18
6.2	Darstellung des theoretisch entstehenden Strahlenprofils (berechnet durch ZEMAX) durch die Zylinderlinse [31]	19
7.1	Darstellung der Aufspannvorrichtung für die Spannung der Verbindungselemente: Ti und PET-G	21
7.2	Darstellung der Installation der Wärmebildkamera (FLIR), die für die Auswertung der abgegebenen Infrarotstrahlung der Verbindungszone verwendet wird	21
7.3	Kenntlichmachung der verschiedenen Messpositionen der Thermoelemente anhand einer Verbindungsnaht	22
8.1	Schematische Darstellung - LAMP-Verfahren - transparenter Kunststoff [14]	23

8.2	SEM Darstellung (A) - Darstellung der Blasen in der Kunststoffphase TEM Darstellung (B) - Zwischen Kunststoff und Metall ersichtlicher natürlicher Oxidfilm [20, S. 1248]	24
9.1	Darstellung des Absorptionsgrades verschiedener Werkstoffe in % in Abhängigkeit der Wellenlänge [8]	29
9.2	Darstellung der Absorption verschiedener Werkstoffe in Abhängigkeit der Temperatur [29, S.33]	31
9.3	Darstellung der Absorption zweier Proben mit unterschiedlicher Ober- fläche in Abhängigkeit von der Temperatur [29, S.36]	31
9.4	Darstellung des Festigkeitsverhaltens amorpher Thermoplaste bei Tem- peratureinwirkung [1, S. 230]	32
10.1	Grafische Darstellung des gemessenen Abstands für die Kollimation - Schematische Darstellung des Strahlenganges im Bearbeitungskopf . . .	35
10.2	Darstellung der verschiedenen Brennflecke als Verfärbung am thermo- sensitiven Papier mit jeweils 70 Watt und 5 Sekunden Bestrahlungsdauer: (a) 30 mm - Abstand X, (b) 40 mm - Abstand X, (c) 36 mm - Abstand X = gewählte Einstellung	36
10.3	Darstellung der verschiedenen Brennpunkte bei unterschiedlichen Be- arbeitungsabständen: Abstandsänderung 1 mm	37
10.4	Darstellung der verschiedenen Brennpunkte im Bereich 73 - 75 mm: Abstandsänderung 0,2 mm	38
10.5	Messkurve der ermittelten Leistung: Modell 25B - 100 W	40
10.6	Messkurve der ermittelten Leistung: Modell 150-50C - 150 W	41
10.7	Vergleich der beiden Messkurven: Model 25B -100 W und Modell 150- 50C - 150 W	42
10.8	Aufnahmen der verschiedenen Oberflächenstrukturen unter dem Auf- lichtmikroskop bei 48-facher Vergrößerung - geschliffen (a) bzw. sand- gestrahlt (b) und (c)	45
10.9	Darstellung einer Verbindung und die für die Berechnung verwendeten Querschnitte	46
10.10	Grafische Darstellung der Verbindungsnahte aus den Vorversuchen: Lei- stungsbereich 110 W-190 W - geschliffene Oberfläche Ra=0,93 μm	47
10.11	Grafische Darstellung der Verbindungsnahte aus den Vorversuchen: Lei- stungsbereich 90 W-170 W - Oberfläche behandelt mit Glasperlengra- nulat Ra=1,48 μm	48
10.12	Grafische Darstellung der Verbindungsnahte aus den Vorversuchen: Lei- stungsbereich 50 W-130 W - Oberfläche behandelt mit Normalkorund Ra=4,02 μm	49
10.13	Verlauf des Spannungsquerschnittes für verschiedenen Oberflächenty- pen in Abhängigkeit der Laserleistung	50
10.14	Verlauf des Bläschenquerschnitts für verschiedenen Oberflächentypen in Abhängigkeit der Laserleistung	51

10.15	Verlauf des Querschnittverhältnisses für verschiedenen Oberflächentypen in Abhängigkeit der Laserleistung	52
10.16	Verlauf der Verbindungsbreite für verschiedenen Oberflächentypen in Abhängigkeit der Laserleistung	52
10.17	Schematische Darstellung der Erhebung oberhalb der Verbindungsnaht nach dem Verbindungsprozess	53
10.18	Darstellung der maximalen Zugfestigkeit und der Bruchdehnung in Abhängigkeit der Laserleistung für geschliffene Titanoberflächen	54
10.19	Darstellung der maximalen Zugfestigkeit und der Bruchdehnung in Abhängigkeit der Laserleistung für Titanoberflächen gestrahlt mit Glasperlengranulat	54
10.20	Darstellung der maximalen Zugfestigkeit und der Bruchdehnung in Abhängigkeit der Laserleistung für Titanoberflächen gestrahlt mit Normalkorund	55
10.21	Darstellung der relativen Bläschenzahl in Abhängigkeit der Laserleistung für die geschliffene Titanoberfläche	57
10.22	Darstellung der relativen Bläschenzahl in Abhängigkeit der Laserleistung für die mit Glasperlen gestrahlte Titanoberfläche	57
10.23	Darstellung der relativen Bläschenzahl in Abhängigkeit der Laserleistung für die mit Normalkorund gestrahlte Titanoberfläche	58
10.24	Darstellung des mittleren Bläschendurchmessers bzw. der Erhebung des PET-G's in Abhängigkeit der Laserleistung für geschliffene Titanoberflächen	58
10.25	Darstellung des mittleren Bläschendurchmessers bzw. der Erhebung des PET-G's in Abhängigkeit der Laserleistung für die mit Glasperlen gestrahlte Titanoberfläche	59
10.26	Darstellung des mittleren Bläschendurchmessers bzw. der Erhebung des PET-G's in Abhängigkeit der Laserleistung für die mit Normalkorund gestrahlte Titanoberfläche	60
10.27	Vergleich der Festigkeitsverläufe für die maximale Zugfestigkeit der Verbindung bei den drei getesteten Oberflächen in Abhängigkeit der Laserleistung	60
10.28	Aufnahmen der verschiedenen Oberflächenstrukturen unter dem Auflichtmikroskop bei 48-facher Vergrößerung: Feinschliff - Ra=0,68 µm (a), geschliffen - Ra=0,95 µm (b) und gestrahlt mit Glasperlen - Ra=1,48 µm (c)	63
10.29	Grafische Darstellung der Verbindungsnahte mit optimierter Nahtgeometrie-Teil 1: Leistungsbereich 110 W-120 W - Titanoberfläche als Feinschliff ausgeführt - Ra=0,68 µm	64
10.30	Grafische Darstellung der Verbindungsnahte mit optimierter Nahtgeometrie-Teil 2: Leistungsbereich 120 W-150 W - Titanoberfläche als Feinschliff ausgeführt - Ra=0,68 µm	64

10.31 Grafische Darstellung der Verbindungsnähte mit optimierter Nahtgeometrie- Teil 1: Leistungsbereich 110 W-120 W - geschliffene Titanoberfläche - Ra=0,95 µm	66
10.32 Grafische Darstellung der Verbindungsnähte mit optimierter Nahtgeometrie- Teil 2: Leistungsbereich 120 W-150 W - geschliffene Titanoberfläche - Ra=0,95 µm	66
10.33 Grafische Darstellung der Verbindungsnähten mit optimierter Nahtgeometrie- Teil 1: Leistungsbereich 90 W-100 W - Titanoberfläche gestrahlt mit Glasperlengranulat - Ra=1,48 µm	68
10.34 Grafische Darstellung der Verbindungsnähte mit optimierter Nahtgeometrie- Teil 2: Leistungsbereich 110 W-130 W - Titanoberfläche gestrahlt mit Glasperlengranulat - Ra=1,48 µm	68
10.35 Darstellung der Verläufe für die Zugfestigkeit, den mittleren Bläschen- durchmesser und die Erhebung des Kunststoffes in Abhängigkeit der Laserleistung - geschliffene Titanoberfläche	71
10.36 Darstellung der Verläufe für die Zugfestigkeit, den mittleren Bläschen- durchmesser und die Erhebung des Kunststoffes in Abhängigkeit der Laserleistung- Titanoberfläche gestrahlt mit Glasperlengranulat	71
10.37 Darstellung der Verläufe für die Zugfestigkeit, den mittleren Bläschen- durchmesser und die Erhebung des Kunststoffes in Abhängigkeit der Laserleistung - Titanoberflächen mit Feinschliff	72
10.38 Vergleich der Festigkeitsverläufe für die maximale Zugfestigkeit für ver- schiedene Titanoberflächen in Abhängigkeit der Laserleistung: Gegen- überstellung der Verbindungen aus den Vorversuchen und der mit op- timierter Nahtgeometrie	74
10.39 Grafische Darstellung der Verbindungsnähte für das gesamte Leistungs- spektrum des Verbindungsprozesses-Teil 1: Leistungsbereich 90 W-130 W - Glasperlengranulat mit Ra=1,48 µm	78
10.40 Grafische Darstellung der Verbindungsnähte für das gesamte Leistungs- spektrum des Verbindungsprozesses-Teil 2: Leistungsbereich 150 W-190 W - Glasperlengranulat mit Ra=1,48 µm	78
10.41 Darstellung der Oberflächentemperatur und der Erhebung in Abhän- gigkeit der Leistung für glasperlengestrahlte Oberflächen - Ra = 1,48 µm	80
10.42 Vergleich von realem Bild mit Wärmebild: Beide Bilder aufgenommen mit der Wärmebildkamera FLIR-One-Pro während des Verbindungs- prozesses	81
10.43 Grafische Darstellung der Temperaturverteilung an der Kunststoffober- fläche als Vorder- und Seitenansicht der Verbindung - Titanoberfläche: gestrahlt mit Glasperlengranulat, bei 120 W Laserleistung	83
10.44 Grafische Darstellung der Temperaturverteilung an der Kunststoffober- fläche als Draufsicht und 3D-Ansicht der Verbindung - Titanoberfläche: gestrahlt mit Glasperlengranulat, bei 120 W Laserleistung	83
10.45 Verteilung der Bläschen bei unterschiedlich eingestellter Laserleistun- gen - Titanoberfläche gestrahlt mit Glasperlengranulat	84

10.46	Grafische Darstellung des Temperaturverlaufes an der Kunststoffoberfläche am Beginn (B) bzw. Mitte (M) der Bearbeitung bei 120 W - Titanoberfläche gestrahlt mit Glasperlengranulat $Ra=1,48\mu m$	85
10.47	Grafische Darstellung des Temperaturverlaufes an der Kunststoffoberfläche am Ende (E) bzw. nach (N) der Bearbeitung bei 120 W - Titanoberfläche gestrahlt mit Glasperlengranulat $Ra=1,48\mu m$	86
10.48	Gemessene Spannungssignale der drei Thermoelemente in kochendem Wasser	87
10.49	Darstellung der gemessenen Spannungsverläufe an den unterschiedlichen Nahtpositionen der Thermoelemente bei 120 W in der Grenzschicht der Verbindung	88
10.50	Zusammenfassende darstellung der Verlaufskurven für glasperlengestrahelte Oberflächen: Zugfestigkeit, Erhebung, Oberflächen- und Grenzflächentemperatur	90
10.51	Grafische Darstellung der Temperaturverteilung an der Titanoberfläche von Seiten- und Vorderansicht bei Bestrahlung mit 120 W - Titanoberfläche gestrahlt mit Glasperlengranulat	92
10.52	Grafische Darstellung der Temperaturwerte an der Titanoberfläche von Draufsicht und 3D-Ansicht der Verbindung bei Bestrahlung mit 120 W - Titanoberfläche gestrahlt mit Glasperlengranulat	92
10.53	Grafische Darstellung des Temperaturverlaufes an der Titanoberfläche am Beginn (B) und Mitte (M) der Titanprobe bei Bestrahlung mit 120 W - Titanoberfläche gestrahlt mit Glasperlengranulat	93
10.54	Grafische Darstellung des Temperaturverlaufes an der Titanoberfläche am Ende (E) und nach der Bestrahlung (N) der Titanprobe mit 120 W - Titanoberfläche gestrahlt mit Glasperlengranulat	94

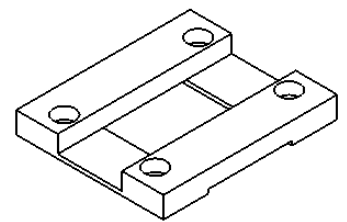
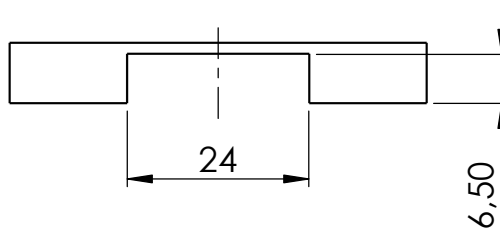
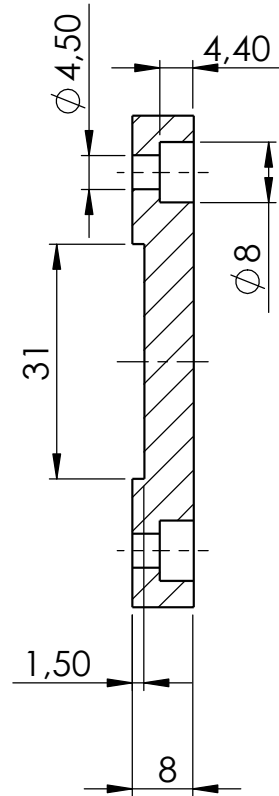
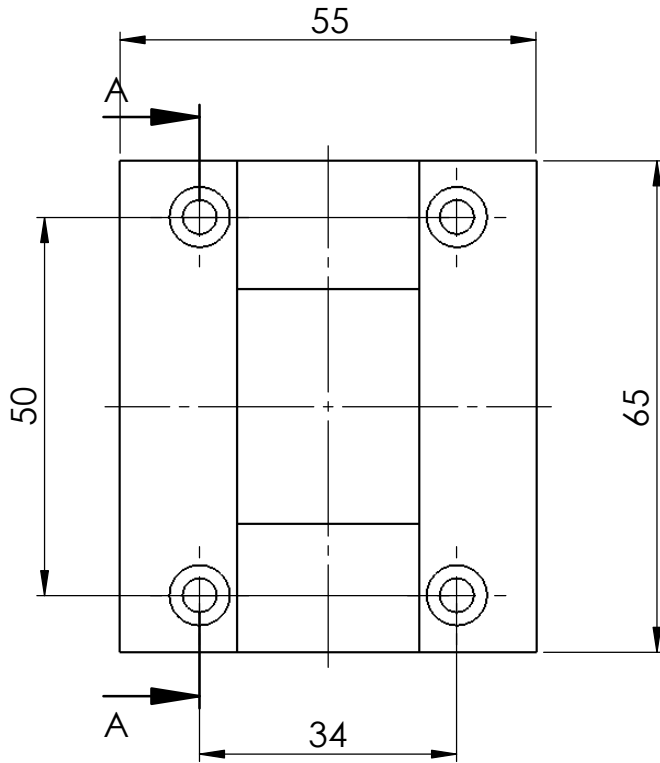
Tabellenverzeichnis

5.1 Kennzeichnungsbeispiel einer Laserschutzbrille: <i>D</i> -Dauerstrichbetrieb bei der Verwendung im zulässigen Wellenlängenbereich [28]	11
10.1 Gemessene Leistungswerte: 10 W - 90 W, Modell 25B	39
10.2 Gemessene Leistungswerte: 10 W - 130 W, Modell 150-50C	41
10.3 Gemessene Parameter der Verbindungen aus den Vorversuchen: 110 W-190 W, geschliffene Oberfläche	47
10.4 Gemessene Parameter der Verbindungen aus den Vorversuchen: 90 W-170 W, mit Glasperlen gestrahlte Oberfläche	48
10.5 Gemessene Parameter der Verbindungen aus den Vorversuchen: 50 W-130 W, mit Normalkorund gestrahlte Oberfläche	49
10.6 Gemessene Parameter des Zugversuches der Verbindungen aus den Vorversuchen: max. Zugfestigkeit und Bruchdehnung - Zwick Z050	56
10.7 Gemessene Parameter der Verbindungen mit optimierte Nahtgeometrie: Titanoberfläche als Feinschliff ausgeführt - $R_a=0,68\mu\text{m}$	65
10.8 Gemessene Parameter der Verbindungen mit optimierte Nahtgeometrie: geschliffene Titanoberfläche - $R_a=0,95\mu\text{m}$	67
10.9 Gemessene Parameter der Verbindungsnahte mit optimierter Nahtgeometrie: Titanoberfläche gestrahlt mit Glasperlengranulat - $R_a=1,48\mu\text{m}$	69
10.10Ermittelte Parameter aus den Zugversuchen der Verbindungen mit optimierter Nahtgeometrie: maximale Zugfestigkeit und Bruchdehnung - Zwick Z050	70
10.11Gemessene Oberflächentemperaturwerte der verschiedenen Proben an der Kunststoffoberfläche - FLIR One Pro	76
10.12Gemessene Oberflächentemperatur des Kunststoffes bestimmt durch die Wärmebildkamera FLIR-One-Pro: Ermittelt für glasperlengestrahlte Probeoberflächen für das gesamtes Leistungsspektrum des Verbindungsprozesses	79
10.13Gemessene Temperaturwerte an der Grenzschicht für glasperlengestrahlte Titanoberflächen	89

12 Anhang

12.1 Niederhalter

3



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT:
BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER
OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:
TOLERANZEN:
LINEAR:
WINKEL:

OBERFLÄCHENGÜTE:

-

ENTGRATEN
UND SCHARFE
KANTEN
BRECHEN

ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN

ÄNDERUNG

1 Stück

BENENNUNG:

65 x 55 x 8

	NAME	SIGNATUR	DATUM		
GEZEICHNET	RATH S.				
GEPRÜFT					
GENEHMIGT					
PRODUKTION	BÖHM M.				
QUALITÄT				WERKSTOFF:	
				-	
				GEWICHT:	

ZEICHNUNGSNR.

Probenhalter

A4

MASSSTAB 1:1

BLATT 1 VON 1

12.2 PET-G

POLYCASA PETG UND PETG UV

1. PRODUKTKENNZEICHNUNG

POLYCASA PETG ist der Handelsname für extrudierte Copolyesterplatten aus Polyethylenterephthalat Glycol (PETG) von POLYCASA. Das POLYCASA PETG-Programm bietet Lösungen sowohl für Innen- als auch Außenanwendungen. Für Außenanwendungen empfehlen wir POLYCASA PETG UV, ein Material mit 10 Jahren Gewährleistung.

Als Ergebnis des Extrusionsprozesses kann POLYCASA, zusätzlich zu den klaren und opalweißen Versionen, eine Vielzahl an Farben und Designs für eine breite Palette an Designerfordernissen anbieten.

2. EIGENSCHAFTEN

POLYCASA PETG-Platten haben gute optische Eigenschaften und eine brillante Oberfläche.

Der POLYCASA PETG-Bereich enthält Platten, die einfach herzustellen sind, vakuumformbar, und eine außerordentliches Niedrigtemperaturverhalten aufweisen.

Wichtige Vorteile von POLYCASA PETG-Platten sind ihre sehr gute chemische Widerstandsfähigkeit und sehr hohe Schlagfestigkeit.

POLYCASA PETG-Platten erfüllen alle gegenwärtigen Vorschriften für Lebensmittelkontakt und können in Kontakt mit unverpackten Lebensmitteln benutzt werden. Unser UV geschütztes PETG ist nicht für den Lebensmittelkontakt vorgesehen und ist deshalb in die Garantie nicht miteingeschlossen.

POLYCASA PETG-Platten kombinieren ebenfalls die folgenden exzellenten Eigenschaften:

- Leichtes Vakuumthermoformen, brauchen keine Vortrocknung
- Außerordentliches Niedrigtemperaturverhalten
- Geringe Wasserabsorption
- Leicht zu recyceln
- Sehr hohe Schlagfestigkeit

3. ANWENDUNGEN

- Bushaltestellen
- Posterverglasungen
- Maschinenschutzvorrichtungen
- Verpackungen für medizinische Geräte
- Displays und Schilder für Außenanwendungen
- Kühlschränke und Ausrüstungen für Kältelagerräume
- Fahrradschutzhelme
- Lebensmittelcontainer
- Lenticulare Linsen, Grafik
- Lichtkontrolle für Risikobereiche

4. FERTIGUNGS- UND ENDBEARBEITUNGSTECHNIKEN

POLYCASA PETG-Platten sind leicht zu bearbeiten.

Fräsen, Bohren, Gewindebohren, Sägen, Scheren und Stanzen, Formstanzen, Laserschneiden, Langlochfräsen, Formen und Kalt- oder Warmbiegen bereiten der POLYCASA PETG-Reihe keine Probleme.

Weitere detaillierte Informationen finden Sie unter dem Punkt 'ANWENDUNGSRICHTLINIEN' in unserer Broschüre.

POLYCASA PETG UND PETG UV

5. TECHNISCHE KENNWERTE

■ ALLGEMEINE			
Eigenschaften	Methode	Einheit	POLYCASA PETG + PETG UV
Dichte	ASTM D1505	g/cm ³	1.27
Rockwell-Härte	ASTM D-785	R-Skala	105
■ OPTISCHE			
Eigenschaften	Methode	Einheit	POLYCASA PETG + PETG UV
Lichtdurchlässigkeit	DIN 5036	%	88
Refraktionszahl	DIN 53491		1.57
Trübung / Haze	ASTM D1003	%	<1
■ MECHANISCHE			
Eigenschaften	Methode	Einheit	POLYCASA PETG + PETG UV
Biegemodul	DIN 53452	MPa	2075
Biegefestigkeit	DIN 53452	MPa	70
Elastizitätsmodul	DIN 53455	MPa	2200
Zugfestigkeit	DIN 53455	MPa	50
Dehnung	DIN 53455	%	54
■ THERMISCHE			
Eigenschaften	Methode	Einheit	POLYCASA PETG + PETG UV
Vicat-Temperatur (B)	DIN 53460	°C	82
Wärmefestigkeitsgrenze (A/B)	DIN 53461	°C	72/68
Spezifisches Wärmeaufnahmevermögen	ASTM D-2766	J/gK	1.1
Koeffizient der linearen Wärmedehnung	DIN 53752	K ⁻¹ x 10 ⁻⁵	6.8
Wärmeleitfähigkeit	DIN 52612	W/mK	0.20
Zersetzungstemperatur		°C	>280
Max. Betriebstemperatur		°C	70
Temperaturbereich der Plattenformung		°C	120-160
■ SCHLAGFESTIGKEIT			
Eigenschaften	Methode	Einheit	POLYCASA PETG + PETG UV
Izod (gekerbt)	ISO 180	kJ/m ²	11.5
Charpy (gekerbt)	DIN 53453	kJ/m ²	10
Charpy (nicht gekerbt)	DIN 53453	kJ/m ²	NB
■ ELEKTRISCHE			
Eigenschaften	Methode	Einheit	POLYCASA PETG + PETG UV
Dielektrizitätskonst. 100 Hz	IEC 250		2.6
Durchgangswiderstand	ASTM D257	Ω.cm	≥10 ¹⁵
Oberflächenwiderstand	ASTM D257	Ω	≥10 ¹⁶
Durchschlagsfestigkeit	ASTM D149	kV/mm	16
Verlustfaktor (50Hz)	IEC 250		0.01

Hinweis: Bei diesen technischen Angaben handelt es sich um typische Richtwerte. Die tatsächlichen Messwerte unterliegen geringfügigen produktionsbedingten Schwankungen.

12.3 Strahlgranulat

Produktdatenblatt Glasperlen



Radler & Ruf
Sandstrahl- und Druckluftbedarf GmbH



Glasperlen sind ein eisenfreies Mehrwegstrahlmittel mit breitem Anwendungsbereich. Es ist zum Strahlen aller metallischen und nichtmetallischen Werkstücke bestens geeignet. Aufgrund der runden Form wird dieses Strahlmittel zur schonenden Reinigung verwendet. Die abrasive d.h. abschleifende Wirkung ist relativ gering. Glasperlen (Panzerglasperlen) eignen sich auch zur Erzielung optisch ansprechender Oberflächen und sind eines der weltweit am meisten verwendeten Strahlmittel.

Strahlssysteme:

- Injektoranlagen
- Druckluftanlagen

Anwendungsbereiche:

Reinigungsstrahlen:

- Entfernen von Rost und Zunderschichten bei metallischen Oberflächen
- Entfernen von Formrückständen an Gussstücken
- Entfernen von Anlaufarben

Oberflächenfinish:

- Veredlung der Oberfläche
- Erzielen optischer Effekte

Kugelstrahlen (shot peening):

- Gezielte Verdichtung der Oberfläche
(Verfestigung der Oberfläche/Verbesserung der mechanischen Eigenschaften)

Umformstrahlen:

- Kugelstrahlen zur Formgebung oder zum Richten von Werkstücken

Chemische Zusammensetzung*:		Mechanische Eigenschaften*:	
SiO ₂	72,0%	Spezifisches Gewicht	2,45 kg/l
Na ₂ O ₃	14,5%	Schüttgewicht	1,50 kg/l
CaO	8,0%	Härte nach Mohs	6,0
MgO	2,5%	Härte nach HRC	47
Al ₂ O ₃	2,0%	Elastizitätsmodul	70 GPa
Sonstige	max. 0,5%	Kornform	rund

* Richtwerte

Verfügbare Korngrößen:

- 40-70µm
- 70-110µm
- 90-150µm
- 100-200µm
- 150-250µm
- 200-300µm
- 300-400µm
- 425-850µm

Verpackungseinheiten: 25kg Säcke (1000kg/Palette)

Produktdatenblatt Normalkorund FeSi



Radler & Ruf
Sandstrahl- und Druckluftbedarf GmbH



Normalkorund FeSi (Strahlkorund) ist ein eisenhaltiges Mehrwegstrahlmittel mit kantigem Korn. Es enthält einen ausschließlich in Silizium gebundenen Eisenanteil. Es ist spröde und weniger standfest als üblicher Normalkorund.

Aufgrund des Eisenanteils sollte dieses Strahlmittel nicht im Edelstahlbereich oder für NE-Metalle eingesetzt werden.

Durch den relativ geringen Anschaffungspreis eignet es sich zum Einsatz im Freiraum oder bei Anwendungen mit kontinuierlichem Strahlmittelverlust. Normalkorund FeSi ist eine Alternative zu üblichen metallischen Strahlmitteln.

Strahlsysteme:

- Injektoranlagen
- Druckluftanlagen

Anwendungsbereiche:

Reinigungsstrahlen:

- Reinigung metallischer Oberflächen mit Materialabtrag (abschleifende Wirkung) bei denen der hohe Eisenanteil nicht störend wirkt
- Entfernen von Rost und Zunderschichten bei metallischen Oberflächen
- Entfernen von Anlauffarben
- Entfernen von Lack

Sonstige:

- Aufräuen von metallischen Oberflächen vor dem Beschichten
- Entgraten

Chemische Zusammensetzung*:		Mechanische Eigenschaften*:	
Al ₂ O ₃	39,00%	Spezifisches Gewicht	5,50 kg/l
Fe	46,00%	Schüttgewicht	2,50 kg/l
Si	7,20%	Härte nach Mohs	9,0
Ti	7,20%	Härte nach Knoop	1.800N/mm ²
TiO ₂	3,00%	Kornform	kantig
Fe ₂ O ₃	0,20%		
SiO ₂	0,30%		
CaO + MgO	0,20%		

* Richtwerte

Verfügbare Korngrößen:

- 0,12-0,25mm
- **0,25-0,50mm**
- 0,50-1,00mm
- 1,00-2,00mm

Verpackungseinheiten: 25kg Säcke (1000kg/Palette)

12.4 FLIR-Wärmebildkamera



FLIR

The FLIR ONE Pro gives you the power to find invisible problems faster than ever. Combining a higher-resolution thermal sensor able to measure temperatures up to 400 °C (752 °F) with powerful measurement tools and report generation capability, the FLIR ONE Pro will work as hard as you do. Its revolutionary VividIR™ image processing lets you see more details and provide your customers with proof that you solved their problem right the first time. The updated design includes the revolutionary OneFit™ adjustable connector to fit your phone, without taking the phone out of its compatible protective case. An improved FLIR ONE app lets you measure multiple temperatures or regions of interest at once and stream to your smartwatch for remote viewing. Whether you're inspecting electrical panels, looking for HVAC problems, or finding water damage, the new FLIR ONE Pro is a tool no serious professional should be without.

VividIR IMAGE PROCESSING

See It & Solve It - Sharpest Mobile Thermal Imaging Performance Lets You Detect Problems with Precision and Accuracy, then Document Your Fix for the Customer

- Most advanced image resolution enhancement detects the thermal details you need to find problems fast
- With 160 x 120 thermal resolution, FLIR ONE Pro uses FLIR's highest resolution micro thermal camera and can measure temperatures as high as 400 °C (752 °F)
- FLIR MSX® embosses visible edges from the 1440 x 1080 HD camera onto thermal imagery to create a sharper, easier to understand picture

OneFit CONNECTOR

Leave Your Case On - Adjustable Connector Means You Don't Have to Choose Between Thermal Vision and Safeguarding Your Device when Using Compatible Protective Cases

- Adjust length of USB-C and Lightning connector up to an additional 4 mm
- Reversible connectors for Android and iOS
- Secure the FLIR ONE to your mobile device while keeping your phone safe

HARD-WORKING APP

Work Like a Pro - Work-Based Features Include Advanced Capabilities for More Professional Problem Solving and Functionality

- Use multiple real-time spot meters and regions of interest
- Access real-time thermal tips and tricks in the FLIR ONE app followed by professional reporting through FLIR Tools
- See around corners and in awkward spaces by connecting to your Apple Watch or Android smartwatch

Specifications

General		FLIR One Pro	
Certifications	MFi (iOS version), RoHS, CE/FCC, CEC-BC, EN61233		
Operating temperature	0 °C – 35 °C (32 °F to 95 °F) , battery charging 0 °C to 30 °C (32 °F to 86 °F)		
Non-operating temperature	-20 °C to 60 °C (-4 °F to 140 °F)		
Size	68mm W x34mm H x14mm D (2.7in x 1.3in x .6in)		
Weight	36.5g		
Mechanical shock	Drop from 1.8m (5.9ft)		
Video			
Thermal and visual cameras with MSX			
Thermal sensor	Pixel size 12µM, 8 – 14µM spectral range		
Thermal resolution	160x120		
Visual resolution	1440x1080		
HFOV / VFOV	55 ° ± 1 ° / 43 ° ± 1 °		
Frame rate	8.7Hz		
Focus	Fixed 15cm – Infinity		
Radiometry			
Scene dynamic range	-20 °C to 400 °C (-4 °F to 752 °F)		
Accuracy	±3 °C (5.4 °F) or ±5%, typical Percent of the difference between ambient and scene temperature. Applicable 60s after start-up when the unit is within 15 °C to 35 °C (59 °F to 95 °F) and the scene is within 5 °C to 120 °C (41 °F to 248 °F)		
Thermal sensitivity (MRTD)	150mK		
Emissivity settings	Matte: 95%, Semi-Matte: 80%, Semi-Glossy: 60%, Glossy: 30% Reflected background temperature is 22 °C (72 °F)		
Shutter	Automatic/Manual		
Power			
Battery life	Approximately 1h		
Battery charge time	40min		
Interfaces			
Video	Male Lightning (iOS), Male USB-C (Android)		
Charging	Female USB-C (5V/1A)		
App			
Video and still image display/capture	Saved as 1440x1080		
File formats	Photo – radiometric jpeg Video – MPEG-4 (file format MOV (iOS), MP4 (Android))		
Capture modes	Video, Photo, Time lapse		
Palettes	Gray (white hot), Hottest, Coldest, Iron, Rainbow, Contrast, Arctic, Lava and Wheel.		
Spot meter	Off / °C / °F. Resolution 0.1 °C / 0.1 °F		
Adjustable MSX distance	0.3m – Infinity		
Battery charge monitor	0 – 100%		

CORPORATE HEADQUARTERS
FLIR Systems, Inc.
27700 SW Parkway Ave.
Wilsonville, OR 97070
PH: +1 877.773.3547

SANTA BARBARA
FLIR Systems, Inc.
6769 Hollister Ave.
Goleta, CA 93117
PH: +1 805.690.6600

www.flir.com
NASDAQ: FLIR

Equipment described herein is subject to US export regulations and may require a license prior to export. Diversion contrary to US law is prohibited. Imagery for illustration purposes only. Specifications are subject to change without notice. ©2017 FLIR Systems, Inc. All rights reserved. 06/06/17
17-1746-OEM-FLIROne_Pro

CHINA
FLIR Systems Co., Ltd
Room 502, West Wing, Hanwei Building
No. 7 Guanghua Ave.
Chaoyang District, Beijing 100004, China
Phone: +86 10-59797755

EUROPE
FLIR Systems, Inc.
Luxemburgstraat 2
2321 Meer
Belgium
PH: +32 (0) 3665 5100

12.5 Thermoelement Typ K

Thermoelement-Referenztabellen

Nickel-Chrom und Nickel-Aluminium

MAXIMALER TEMPERATURBEREICH

Thermoelementleitung
-328 bis 2282°F, -200 bis 1250°C

Verlängerungsleitung
32 bis 392°F, 0 bis 200°C

FEHLERTOLERANZEN

(je nachdem, welcher Wert größer ist)

Standard: 2,2°C oder 0,75% über 0°C

2,2°C oder 2,0% unter 0°C

Besonders enge Fehlertoleranz: 1,1°C oder 0,4%

KOMMENTARE, UMGEBUNG FÜR

UNISOLIERTE LEITUNGEN: Sauber oxidierend

und chemisch inaktiv; Nur begrenzt einsetzbar

in Vakuum oder reduzierender Umgebung;

Großer Temperaturbereich; Gängigster Typ

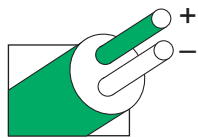
TEMPERATUR IN °C

VERGLEICHSTELLE BEI 0°C

TYP

Referenztabellen
N.I.S.T.
Monograph 175
Nach
ITS-90

K



IEC-584-3

Farbcodierung:
Thermoelement-
und Ausgleichs-
leitung

Thermoelektrische Spannung in mV

°C	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	°C	°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
-260	-6.458	-6.457	-6.456	-6.455	-6.453	-6.452	-6.450	-6.448	-6.446	-6.444	-6.441	-260	250	10.153	10.194	10.235	10.276	10.316	10.357	10.398	10.439	10.480	10.520	10.561	250
-250	-6.441	-6.438	-6.435	-6.432	-6.429	-6.425	-6.421	-6.417	-6.413	-6.408	-6.404	-250	260	10.561	10.602	10.643	10.684	10.725	10.766	10.807	10.848	10.889	10.930	10.971	260
													270	10.971	11.012	11.053	11.094	11.135	11.176	11.217	11.259	11.300	11.341	11.382	270
													280	11.382	11.423	11.465	11.506	11.547	11.588	11.630	11.671	11.712	11.753	11.795	280
													290	11.795	11.836	11.877	11.919	11.960	12.001	12.043	12.084	12.126	12.167	12.209	290
													300	12.209	12.250	12.291	12.333	12.374	12.416	12.457	12.499	12.540	12.582	12.624	300
-240	-6.404	-6.399	-6.393	-6.388	-6.382	-6.377	-6.370	-6.364	-6.358	-6.351	-6.344	-240	310	12.624	12.665	12.707	12.748	12.790	12.831	12.873	12.915	12.956	12.998	13.040	310
-230	-6.344	-6.337	-6.329	-6.322	-6.314	-6.306	-6.297	-6.289	-6.280	-6.271	-6.262	-230	320	13.040	13.081	13.123	13.165	13.206	13.248	13.290	13.331	13.373	13.415	13.457	320
-220	-6.262	-6.252	-6.243	-6.233	-6.223	-6.213	-6.202	-6.192	-6.181	-6.170	-6.158	-220	330	13.457	13.498	13.540	13.582	13.624	13.665	13.707	13.749	13.791	13.833	13.874	330
-210	-6.158	-6.147	-6.135	-6.123	-6.111	-6.099	-6.087	-6.074	-6.061	-6.048	-6.035	-210	340	13.874	13.916	13.958	14.000	14.042	14.084	14.126	14.167	14.209	14.251	14.293	340
-200	-6.035	-6.021	-6.007	-5.994	-5.980	-5.965	-5.951	-5.936	-5.922	-5.907	-5.891	-200	350	14.293	14.335	14.377	14.419	14.461	14.503	14.545	14.587	14.629	14.671	14.713	350
													360	14.713	14.755	14.797	14.839	14.881	14.923	14.965	15.007	15.049	15.091	15.133	360
-190	-5.891	-5.876	-5.861	-5.845	-5.829	-5.813	-5.797	-5.780	-5.763	-5.747	-5.730	-190	370	15.133	15.175	15.217	15.259	15.301	15.343	15.385	15.427	15.469	15.511	15.554	370
-180	-5.730	-5.713	-5.695	-5.678	-5.660	-5.642	-5.624	-5.606	-5.588	-5.569	-5.550	-180	380	15.554	15.596	15.638	15.680	15.722	15.764	15.806	15.848	15.891	15.933	15.975	380
-170	-5.550	-5.531	-5.512	-5.493	-5.474	-5.454	-5.435	-5.415	-5.395	-5.374	-5.354	-170	390	15.975	16.017	16.059	16.102	16.144	16.186	16.228	16.270	16.313	16.355	16.397	390
-160	-5.354	-5.333	-5.313	-5.292	-5.271	-5.250	-5.228	-5.207	-5.185	-5.163	-5.141	-160	400	16.397	16.439	16.482	16.524	16.566	16.608	16.651	16.693	16.735	16.778	16.820	400
-150	-5.141	-5.119	-5.097	-5.074	-5.052	-5.029	-5.006	-4.983	-4.960	-4.936	-4.913	-150	410	16.820	16.862	16.904	16.947	16.989	17.031	17.074	17.116	17.158	17.201	17.243	410
													420	17.243	17.285	17.328	17.370	17.413	17.455	17.497	17.540	17.582	17.624	17.667	420
-140	-4.913	-4.889	-4.865	-4.841	-4.817	-4.793	-4.768	-4.744	-4.719	-4.694	-4.669	-140	430	17.667	17.709	17.752	17.794	17.837	17.879	17.921	17.964	18.006	18.049	18.091	430
-130	-4.669	-4.644	-4.618	-4.593	-4.567	-4.542	-4.516	-4.490	-4.463	-4.437	-4.411	-130	440	18.091	18.134	18.176	18.218	18.261	18.303	18.346	18.388	18.431	18.473	18.516	440
-120	-4.411	-4.384	-4.357	-4.330	-4.303	-4.276	-4.249	-4.221	-4.194	-4.166	-4.138	-120	450	18.516	18.558	18.601	18.643	18.686	18.728	18.771	18.813	18.856	18.898	18.941	450
-110	-4.138	-4.110	-4.082	-4.054	-4.025	-3.997	-3.968	-3.939	-3.911	-3.882	-3.852	-110	460	18.941	18.983	19.026	19.068	19.111	19.154	19.196	19.239	19.281	19.324	19.366	460
-100	-3.852	-3.823	-3.794	-3.764	-3.734	-3.705	-3.675	-3.645	-3.614	-3.584	-3.554	-100	470	19.366	19.409	19.451	19.494	19.537	19.579	19.622	19.664	19.707	19.750	19.792	470
													480	19.792	19.835	19.877	19.920	19.962	20.005	20.048	20.090	20.133	20.175	20.218	480
-90	-3.554	-3.523	-3.492	-3.462	-3.431	-3.400	-3.368	-3.337	-3.306	-3.274	-3.243	-90	490	20.218	20.261	20.303	20.346	20.389	20.431	20.474	20.516	20.559	20.602	20.644	490
-80	-3.243	-3.211	-3.179	-3.147	-3.115	-3.083	-3.050	-3.018	-2.986	-2.953	-2.920	-80	500	20.644	20.687	20.730	20.772	20.815	20.857	20.900	20.943	20.985	21.028	21.071	500
-70	-2.920	-2.887	-2.854	-2.821	-2.788	-2.755	-2.721	-2.688	-2.654	-2.620	-2.587	-70	510	21.071	21.113	21.156	21.199	21.241	21.284	21.326	21.369	21.412	21.454	21.497	510
-60	-2.587	-2.553	-2.519	-2.485	-2.450	-2.416	-2.382	-2.347	-2.312	-2.278	-2.243	-60	520	21.497	21.540	21.582	21.625	21.668	21.710	21.753	21.796	21.838	21.881	21.924	520
-50	-2.243	-2.208	-2.173	-2.138	-2.103	-2.067	-2.032	-1.996	-1.961	-1.925	-1.889	-50	530	21.924	21.966	22.009	22.052	22.094	22.137	22.179	22.222	22.265	22.307	22.350	530
													540	22.350	22.393	22.435	22.478	22.521	22.563	22.606	22.649	22.691	22.734	22.776	540
-40	-1.889	-1.854	-1.818	-1.782	-1.745	-1.709	-1.673	-1.637	-1.600	-1.564	-1.527	-40	550	22.776	22.819	22.862	22.904	22.947	22.990	23.032	23.075	23.117	23.160	23.203	550
-30	-1.527	-1.490	-1.453	-1.417	-1.380	-1.343	-1.305	-1.268	-1.231	-1.194	-1.156	-30	560	23.203	23.245	23.288	23.331	23.373	23.416	23.458	23.501	23.544	23.586	23.629	560
-20	-1.156	-1.119	-1.081	-1.043	-1.006	-0.968	-0.930	-0.892	-0.854	-0.816	-0.778	-20	570	23.629	23.671	23.714	23.757	23.799	23.842	23.884	23.927	23.970	24.012	24.055	570
-10	-0.778	-0.739	-0.701	-0.663	-0.624	-0.586	-0.547	-0.508	-0.470	-0.431	-0.392	-10	580	24.055	24.097	24.140	24.182	24.225	24.267	24.310	24.353	24.395	24.438	24.480	580
0	-0.392	-0.353	-0.314	-0.275	-0.236	-0.197	-0.157	-0.118	-0.079	-0.039	0.000	0	590	24.480	24.523	24.565	24.608	24.650	24.693	24.735	24.778	24.820	24.863	24.905	590
													600	24.905	24.948	24.990	25.033	25.075	25.118	25.160	25.203	25.245	25.288	25.330	600
10	0.397	0.437	0.477	0.517	0.557	0.597	0.637	0.677	0.718	0.758	0.798	10	610	25.330	25.373	25.416	25.458	25.500	25.543	25.585	25.627	25.670	25.712	25.755	610
20	0.798	0.838	0.879	0.919	0.960	1.001	1.041	1.081	1.122	1.163	1.203	20	620	25.755	25.797	25.840	25.882	25.924	25.967	26.009	26.052	26.094	26.136	26.179	620
30	1.203	1.244	1.285	1.326	1.366	1.407	1.448	1.489	1.530	1.571	1.612	30	630	26.179	26.221	26.263	26.306	26.348	26.390	26.433	26.475	26.517	26.560	26.602	630
40	1.612	1.653	1.694	1.735	1.776	1.817	1.858	1.899	1.941	1.982	2.023	40	640	26.602	26.644	26.687	26.729	26.771	26.814	26.856	26.898	26.940	26.983	27.025	640
													650	27.025	27.067	27.109	27.152	27.194	27.236	27.278	27.320	27.363	27.405	27.447	650
50	2.023	2.064	2.106	2.147	2.188	2.230	2.271	2.312	2.354	2.395	2.436	50	660	27.447	27.489	27.531	27.574	27.616	27.658	27.700	27.742	27.784	27.826	27.869	660
60	2.436	2.478	2.519	2.561	2.602	2.644	2.685	2.727	2.768	2.810	2.851	60	670	27.869	27.911	27.953	27.995	28.037	28.079	28.121	28.163	28.205	28.247	28.289	670
70	2.851	2.893	2.934	2.976	3.017	3.059	3.100	3.142	3.184	3.225	3.267	70	680	28.289	28.332	28.374	28.416								