Modifikation von Materialien mit einer ferritisch-martensitischen Struktur durch Laserbestrahlung

von
Daniel Murtic, BSc
1225206

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplomingenieur

eingereicht an der
Technischen Universität Wien

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

Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

Wien, November 2019

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur genannt habe. Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, am 28. Oktober 2019

Daniel Murtic

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Abstract

Deutsch

Stahl mit einer ferritisch-martensitischen Struktur, sogenannter Dualphasenstahl, hat vor allem im Automotive Bereich einen hohen Stellenwert, da die mechanisch - technologischen Eigenschaften eine Optimierung des Gesamtgewichtes mit verbessertem Unfallverhalten in Einklang bringen. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Modifikation von Dualphasenstählen mittels Laserbestrahlung durch einen Faserlaser. Dafür wird mittels statistischer Versuchsplanung ein Modell erstellt, welches die Zusammenhänge zwischen betrachteten Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen beschreiben soll, um dabei einen Beitrag zur Optimierung des Wärmebehandlungsprozesses leisten zu können. Dabei werden Blechproben mit einer Dicke von 1.6mm, bestehend aus DP1000 in einem definierten Prozessfenster, bestrahlt. Die Temperatur, welche sich während der Bestrahlung einstellt, wird mittels Thermoelementen ermittelt. Der Absorptionsgrad ist anfänglich unbekannt und stark werkstoffabhängig, da von der Oberflächenbeschaffenheit beeinflusst. Dieser muss, um einen stabilen und vorhersagbaren Prozess zu gewährleisten, bekannt sein. Die ermittelten Temperaturdaten werden verwendet, um die Wärmeverteilung innerhalb des Probenkörpers zu rekonstruieren und somit den Absorptionsgrad unter vorherrschenden Bedingungen zu ermitteln. Des Weiteren wird die Wärmeeinflusszone auf ihre mechanischen Eigenschaften hin untersucht um festzustellen wie die jeweiligen Eingangsparameter sich auf die Proben auswirken.

Englisch

Steel with a ferritic-martensitic structure, so called dualphase steel is a commonly used material especially in the automotive industry. This is the fact due to its mechanical properties that allow to reach the neccessary high structural robustness guaranteeing passenger safety and simultaneously optimizing the weight of the structure. This paper focuses on analyzing the alteration of the underlying material while being exposed to laser irradiation emitted by a fibre laser. A design of experiment is conducted in order to create a model that shows the interaction and interdependencies between the input and output paramters. For this purpose a DP1000 steel sheet with a thickness of 1.6mm was irradiated within a defined process window. The temperatures are being monitored

by thermoelements that are applied to the backside of the steel sheet. The absorptivity is initially unknown and depends strongly on the surface properties of the material. The temperature data will therefore be used to reconstruct the heat distribution within the underlying material to identify the steels absorptivity of laser irradiation. Furthermore the heat affected zone will be analyzed concerning its spatial distribution and its present hardness compared to the untreated base material. All of these attributes are used to optimize the laser hardening process by means of design of experiments and its evaluation techniques.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **7**

1.1 Laserumwandlungshärten . . . 7

1.2 Statistische Versuchsplanung . . . 7

2 Physikalische Grundlagen des LASER **8**

2.1 Der Laser . . . 8

2.1.1 Das Licht . . . 9

2.1.2 Stimulierte Emission . . . 10

2.2 Faserlaser . . . 12

2.2.1 Eigenschaften des Lasersystems . . . 12

3 Dualphasenstähle **16**

3.1 Eigenschaften von Dualphasenstählen . . . 16

3.2 Herstellungsverfahren . . . 17

3.3 Wärmebehandlung von Stahl . . . 19

3.4 Laserumwandlungshärten . . . 21

4 Versuchsführung und Auswertung **24**

4.1 Werkstoffeigenschaften . . . 24

4.2 Metallographische Auswertung . . . 25

4.3 Temperaturmessung . . . 26

4.3.1 Grundlagen der Thermoelemente . . . 27

4.3.2 Auswertung Maximaltemperatur . . . 29

4.4 Härtemessung nach Vickers . . . 30

4.4.1 Auswertung Oberflächenhärte . . . 32

4.4.2 Härteverlauf über Probendicke . . . 38

4.5 Zusammenfassung der Ergebnisse . . . 39

5 Absorptionsgrad **40**

5.1 Theoretische Grundlagen der Absorption . . . 40

5.2 Wärmeleitung . . . 42

5.2.1 Simple Lösungen der linearen Wärmeleitungsgleichung . . . 43

5.2.2 Laplacesche Lösung für unendliche Körper . . . 45

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

5.2.3 Halbunendliche Körper 45
5.2.4 Instationäre Wärmeleitung infolge der Wärmebehandlung 47
5.2.5 Die kreisförmige Wärmequelle 49
5.2.6 Lösung für finite Körper und kleine Zeitwerte 50

6 statistische Versuchsplanung - DoE 53
6.1 Versuchsplanung 53
6.1.1 Qualitätsmerkmale 53
6.1.2 Parameter 54
6.1.3 Stufen 54
6.2 Versuchsdesign 55
6.3 Versuchsdurchführung 56
6.3.1 Prozessfenster 56
6.4 Statistische Versuchsauswertung 58
6.4.1 Versuchsplanung MATLAB 58
6.4.2 Haupteffekte 60
6.4.3 Wechselwirkungen 67
6.4.4 Lineares Beschreibungsmodell 74
6.4.5 Response Surface Method 75

7 Zusammenfassung und Ausblick 83
7.1 Zusammenfassung 83
7.2 Ausblick 83

8 Anhang 84

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

1 Einleitung

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt in der Ermittlung und Beschreibung des Absorptionsgrades des vorliegenden Dualphasenstahls während der Laserbestrahlung und der damit verbundenen Veränderung der mechanisch-technologischen Eigenschaften. DP-Stähle vereinen sowohl Festigkeit als auch Umformbarkeit, diese Eigenschaften spiegeln die Wichtigkeit dieses Werkstoffes für die Automotivindustrie wider, da ökologische Gewichtsreduktionsziele erreicht werden können, ohne einen Trade-Off im Bereich der Fahrzeugsicherheit hinnehmen zu müssen.

1.1 Laserumwandlungshärten

Das Laserumwandlungshärten ist ein relativ junges Verfahren, welches mittels gezielter Wärmeführung eine harte Randschicht durch Austenitisierung an Bauteilen erzeugt. Nach DIN 10052 zählt das Laserumwandlungshärten zu den Verfahren des Randschichthärtens, dieses beschränkt sich auf die Austenitisierung der Randschicht des jeweiligen Werkstückes. Im Fall von dünnen Blechen kann jedoch mittels Laserbestrahlung über die gesamte Werkstückdicke wärmebehandelt werden.

1.2 Statistische Versuchsplanung

Die konventionelle Versuchsführung wird nach dem Prinzip *One Variable at a Time* durchgeführt. Das bedeutet, dass pro Versuchsdurchgang eine Variable variiert, während alle anderen Paramter gleichbleiben. Diese Methode verlangt nach einer Vielzahl von Durchgängen, und trifft das gewünschte Versuchsergebnis ein, so ist eine Rückverfolgbarkeit auf den verantwortlichen Paramater, wenn möglich, äußerst aufwendig. Die statistische Versuchsplanung und -führung versucht hier entgegenzuwirken. DoE entstand in den 20er Jahren des 20. Jahrhunderts in der Agrikultur. Damit wurde es möglich, die Anzahl an Versuchen stark zu reduzieren, die Auswirkungen beziehungsweise Versuchsergebnisse einzelnen Faktoren direkt zuzuordnen und die Interdependenzen zwischen den jeweiligen Faktoren zu erkennen. Somit entsteht eine ganzheitliche Betrachtung des zugrundeliegenden Sachverhaltes, der statistisch analysiert und iterativ verbessert werden kann.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

2 Physikalische Grundlagen des LASER

2.1 Der Laser

Das Wort LASER stellt ein Akronym für Light Amplification by Stimulated Emission dar. Dieses beschreibt den physikalischen Vorgang der Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Photonen. Vereinfacht kann gesagt werden, dass die Laserstrahlerzeugung auf einer Energieemission, welche bei dem Wechsel eines Elektrons von einem Level hoher zu niedriger Energie erzeugt wird, beruht. Die erstmalige Definition des Wortes Laser erfolgte 1957 durch Gordon Gould, welcher auch als einer der Erfinder bekannt wurde. Im Allgemeinen besteht ein Laser aus drei Hauptkomponenten (deren genaue Aufgaben und Funktionen werden im weiteren Verlauf erläutert):

- aktives Medium (Gas, Flüssigkeit od. Festkörper zur Verstärkung)
- Energiepumpe (pumpt Photonen in angeregtes Niveau innerhalb des akt. Mediums)
- Resonator (durch selektive Rückkopplung wird Laserlicht mit wenigen Moden erzeugt)

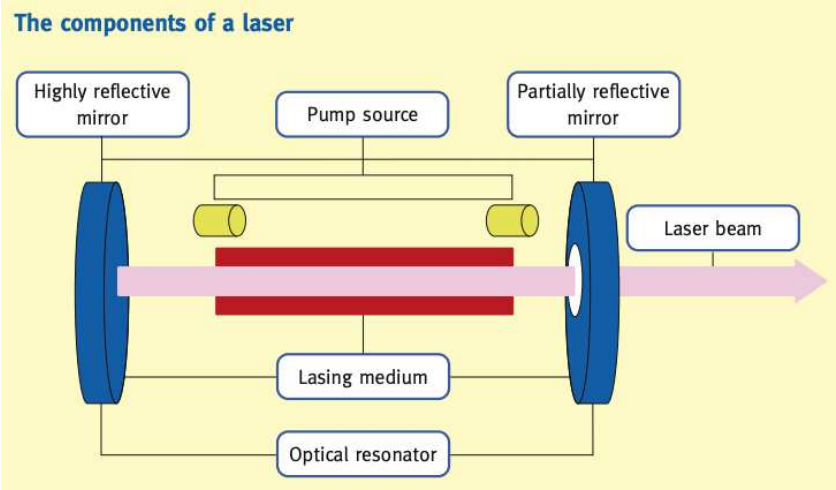


Abbildung 2.1: Prinzipskizze Laseraufbau [1]

Um das Wirkprinzip des Lasers zu verstehen werden, nachfolgend notwendige Begrifflichkeiten erläutert und Zusammenhänge erschlossen. Es wird ein grober Überblick

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

geschaffen, um die notwendigen theoretischen Grundzüge zu verstehen und dabei nicht den Rahmen der Arbeit zu strapazieren.

2.1.1 Das Licht

Mitte des 19. Jahrhunderts konnte James Clerk Maxwell beweisen, dass Licht eine elektromagnetische Welle ist. Die Ausbreitung ebendieser Welle kann durch eine Ableitung aus den Maxwell-Gleichungen beschrieben werden:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \tag{2.1}$$

Transversale elektromagnetische Mode - TEM_{mn}

Elektromagentische Wellen wie Licht werden durch sogenannate transversale elektromagnetische Moden (TEM) beschrieben. Bei diesem Sonderfall stehen die elektrische und die magnetische Feldkomponente normal zur Ausbreitungsrichtung. Die Unterscheidung zwischen TEM wird durch zwei Indizes (m, n) getroffen, diese geben die Modenanzahl in jeweils orthogonaler Richtung an. Die numerischen Lösungen der Wellengleichung können unterschiedliche Intensitätsverteilungen in Abhängigkeit des Resonatoraufbaus generieren. Dabei haben der Abstand (l), die Krümmungsradien (r_1 und r_2), die Durchmesser und die Form der Spiegel Einfluss auf die Modenform.

$$X_m(x,z) = \sqrt{\frac{w_0}{w(z)}} H_m\left(\frac{\sqrt{2}x}{w(z)}\right) \exp\left(-\frac{x^2}{w^2(z)} - i\frac{kx^2}{2R(z)} + i\frac{2m+1}{2}\zeta(z)\right) \tag{2.2}$$

$$Y_n(y,z) = \sqrt{\frac{w_0}{w(z)}} H_n\left(\frac{\sqrt{2}y}{w(z)}\right) \exp\left(-\frac{y^2}{w^2(z)} - i\frac{ky^2}{2R(z)} + i\frac{2n+1}{2}\zeta(z)\right) \tag{2.3}$$

Die Lösungen der Hermite - Polynome (siehe Gleichung 2.2 und 2.3) beschreiben die vorliegenden TEM des Laserstrahles. Der Gauß-Strahl(TEM_{00}) stellt sich für $m = n = 0$

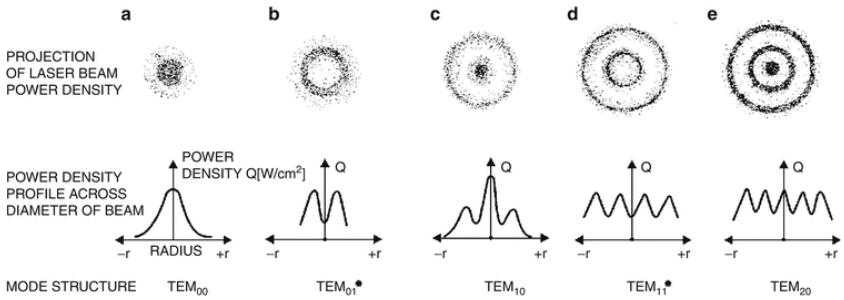


Abbildung 2.2: Transversale Intensitätsverteilung

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

bei $X_m = Y_m = 1$ ein. Dieser ist eine, in Ausbreitungsrichtung rotationssymmetrische, elektromagnetische Welle die die Charakteristika eines Laserstrahls ausreichend gut beschreibt und weit verbreitet im Bereich der Lasermaterialbearbeitung ist. Entsprechend

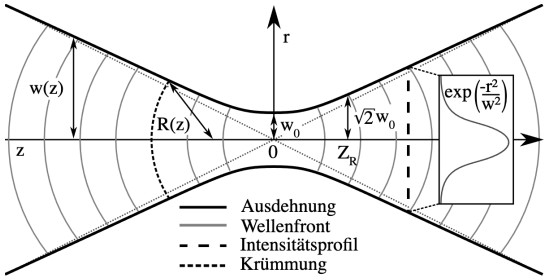


Abbildung 2.3: Gauß - Strahl

nachfolgender Gleichung nimmt die Intensität in radialer Richtung ab:

$$I(r) = I_0 e^{-2\frac{r}{w}^2} \tag{2.4}$$

2.1.2 Stimulierte Emission

Atome werden durch Stöße mit Elektronen oder durch Absorption von Photonen angeregt. Nach Bohr können Elektronen von einem Energieniveau in ein anderes wechseln, wenn sie in der Lage sind, definierte Mengen an Energie aufzunehmen oder zu emittieren. Der Energiegehalt dieses auftreffenden Photons ist nach dem Plankschen Wirkungsraum definiert:

$$E = h \cdot v \tag{2.5}$$

Trifft ein Photon das Atom, so wird dieses aus seinem energetischen Grundzustand E_1 in den angeregten Zustand E_2 gehoben. Das Photon wird bei dem Aufprall absorbiert, somit ist die Photonenergie E_{ph} als Energiedifferenz (siehe 2.6) ΔE ersichtlich [2].

$$\Delta E = E_2 - E_1 \tag{2.6}$$

Das Atom, welchem Energie in Form eines Photons zugeführt wurde, ist nun in einem angeregten Zustand. Ein eintreffendes Photon mit einem Energieniveau zwischen vorhandenem angeregten Zustand und einem tiefer liegenden Energiezustand kann das Atom stimulieren, auf das tiefere Niveau zu wechseln und dabei ein weiteres Photon mit gleichen physikalischen Eigenschaften sowie Energie zu generieren. Das Prinzip der stimulierten Emission ist in Abbildung 2.4 dargestellt.
Innerhalb des Resonators des Lasers läuft die stimulierte Emission weiter, was in einer Verstärkung resultiert. Der Großteil der Atome muss in dem stimulierten Zustand gehal-

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

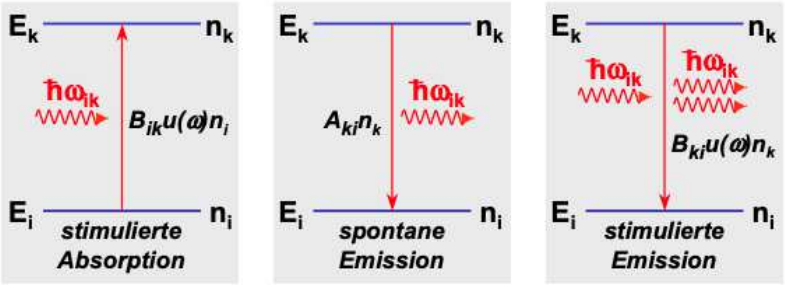


Abbildung 2.4: Stimulierte Emission

ten werden, dies wird als Besetzungsinversion bezeichnet (liegt vor, wenn mehr Teilchen in einem energetisch höheren Zustand E_2 als im energetisch niedrigeren Zustand E_1 vorhanden sind). Die Besetzungsinversion kann nicht im thermischen Gleichgewichtszustand eingestellt werden, ergo muss dem System Energie zugeführt werden. Dies wird durch die Pumpenergie sichergestellt. Die elektromagnetische Welle wird mit jedem Durchgang durch das aktive Medium an den Spiegeln im Resonator reflektiert, und somit stellt sich eine Verstärkung nach folgendem Prinzip ein (siehe Abbildung 2.5) [3].

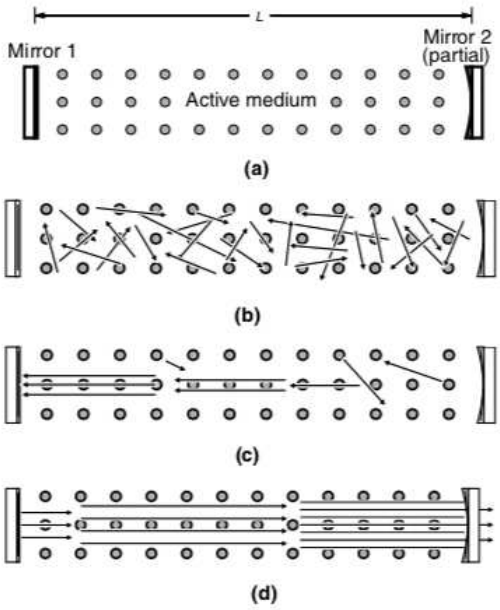


Abbildung 2.5: Verstärkung im Resonator [3]

Wie in Abbildung 2.1 und 2.5 erkennbar, sorgt der Spiegel mit reduzierter Reflektivität ($R < 100\%$, rechts) dafür, dass eine endliche Anzahl an Photonen den Resonator als

- monochromatischer (gleiche Wellenlänge und Frequenz)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

- gerichteter
- kohärenter (Wellenauslenkung des Lichtes gleich)

Laserstrahl verlassen kann. Dieser wird entsprechend oben genannten Moden auftreten. Eine Mode beschreibt die zeitlich stationären Eigenschaften einer Welle, die Welle wird als Summe unterschiedlicher Moden beschrieben, Moden beschreiben weiters die räumliche Verteilung der Intensität [1, 4].

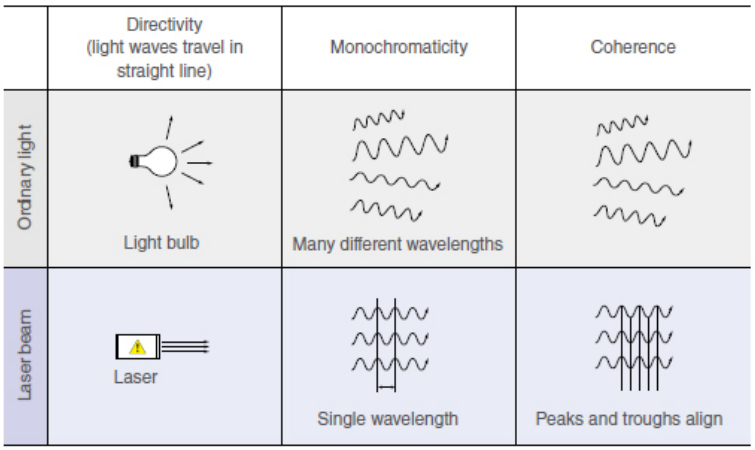


Abbildung 2.6: Allgemeine Eigenschaften des Laserstrahls [5]

2.2 Faserlaser

Am Anfang dieser Arbeit wurde das theoretische Wirkprinzip des Lasers beschrieben, nachfolgend soll auf die Besonderheiten des verwendeten Lasertypus eingegangen werden. Die Versuchsführung wurde mit einem Festkörper (Nd:YAG) Faserlaser der Firma IPG durchgeführt. Der Faserlaser stellt eine besondere Form des Festkörperlasers dar, da die Lichtfaser die Strahlführung über große Distanzen mit ausreichender Strahlqualität gewährleistet. Wie der Name Festkörperlaser schon vermuten lässt, ist das laseraktive Medium in diesem Fall ein Festkörper, welcher aus einem Neodym dotierten Yttrium-Aluminium-Granat besteht. Die Anregung erfolgt rein optisch, in Hinblick auf den Wirkungsgrad wird die Verwendung von Dioden zur Anregung empfohlen. Der Faserlaser zeichnet sich durch einen hohen Wirkungsgrad, ($\eta \approx 30\%+$) gepaart mit hoher Strahlqualität, aus.

2.2.1 Eigenschaften des Lasersystems

Für die Beschreibung der vorliegenden Sachverhalte ist es notwendig, die Eigenschaften des Laserstrahls mathematisch ausreichend genau zu beschreiben. Die zugrundeliegen-

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Abbildung 2.7: Lasersystem

den Eigenschaften des Lasersystems wurden aus dem, von der Herstellerfirma IPG zur Verfügung gestellten, Testprotokoll (siehe Anhang, Protokoll S/N 7171850 Form 38229 Revision 9) entnommen. Nachfolgend wurde das Strahlprofil nach 100μm Arbeitsfaser herangezogen.

Strahleigenschaften				
Bezeichnung	Wellenlänge	λ	1070.5	nm
	Strahlparameterprodukt	BPP	2.8	mm mrad
	Strahlradius	w_0	94.365	μm
	Rayleighlänge	z_r	3.183	mm
	Nominalleistung	P_{nom}	1545	W

Tabelle 2.1: Laserprofil nach 100μm Arbeitsfaser

Für die weiteren Berechnungen ist es notwendig, Aussagen über die Leistungsdichte treffen zu können. Diese wird folgend definiert:

$$I = \frac{P}{A} = \left[\frac{W}{mm^2}\right] \tag{2.7}$$

Wie in Gleichung 2.7 durch Betrachtung der Einheiten ersichtlich wird, definiert die Leistungsdichte die pro Flächeneinheit aufgenommene Leistung. Basierend auf den Prüfprotokollen des Lasersystems wird angenommen, dass der vorliegende Laserstrahl einem

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Gauß-Strahl ausreichend ähnelt. Es muss daher berücksichtigt werden, dass der Laserradius von der Fokuslage abhängt, siehe Abbildung 6.4. Die Aufweitung des Strahles in Abhängigkeit der Defokussierung entlang der z-Achse wird folgend beschrieben:

$$w(z) = w_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_r}\right)^2} \tag{2.8}$$

Unter Berücksichtigung unserer Versuchsführung und der damit verbundenen Parametervariation ergeben sich folgende Werte:

$$w(30mm) = 0.094365mm \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{30mm}{3.183mm}\right)^2} = 0.894389mm \tag{2.9}$$

$$w(35mm) = 0.094365mm \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{35mm}{3.183mm}\right)^2} = 1.04191mm \tag{2.10}$$

In Tabelle 5.1 wird die errechnete Strahlaufweitung zur Beschreibung der Leistungsdichte herangezogen. Es ist notwendig, klare Aussagen über die Leistungsdichte (Intensität) machen zu können, da dies für die Modellierung des Temperaturverlaufs über die Werkstückdicke notwendig ist.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Versuchsdurchgang	**Parameter**	**Strahlradius** $w(z) = w_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_r}\right)^2}$	**Fläche** $A = w(z)^2 \cdot \pi$	**Leistungsdichte** $I = \frac{P}{A}$
DoE1	$P = 320W$ $f = 30mm$ $v = 20\frac{mm}{s}$	$0.8944mm$	$2.5131mm^2$	$1.2734 \cdot 10^8 \frac{W}{m^2}$
DoE2	$P = 480W$ $f = 30mm$ $v = 20\frac{mm}{s}$	$0.8944mm$	$2.5131mm^2$	$1.9100 \cdot 10^8 \frac{W}{m^2}$
DoE3	$P = 320W$ $f = 30mm$ $v = 30\frac{mm}{s}$	$0.8944mm$	$2.5131mm^2$	$1.2734 \cdot 10^8 \frac{W}{m^2}$
DoE4	$P = 480W$ $f = 30mm$ $v = 30\frac{mm}{s}$	$0.8944mm$	$2.51306mm^2$	$1.9100 \cdot 10^8 \frac{W}{m^2}$
DoE5	$P = 320W$ $f = 35mm$ $v = 20\frac{mm}{s}$	$1.0419mm$	$3.4104mm^2$	$9.3829 \cdot 10^7 \frac{W}{m^2}$
DoE6	$P = 480W$ $f = 35mm$ $v = 20\frac{mm}{s}$	$1.0419mm$	$3.4104mm^2$	$1.4074 \cdot 10^8 \frac{W}{m^2}$
DoE7	$P = 320W$ $f = 35mm$ $v = 30\frac{mm}{s}$	$1.0419mm$	$3.4104mm^2$	$9.3829 \cdot 10^7 \frac{W}{m^2}$
DoE8	$P = 480W$ $f = 35mm$ $v = 30\frac{mm}{s}$	$1.0419mm$	$3.4104mm^2$	$1.4074 \cdot 10^8 \frac{W}{m^2}$

Tabelle 2.2: Leistungsdichte in Abhängigkeit der Eingangsparameter

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

3 Dualphasenstähle

Die Motivation dieser Arbeit liegt in der Analyse und Beschreibung der Modifikation von Dualphasenstählen mittels Laserbestrahlung. Dahingehend soll in diesem Abschnitt erläutert werden, welche Vorzüge diese Materialien bieten, wie sie hergestellt werden, und in welchen Anwendungsgebieten sie zum Einsatz kommen.

3.1 Eigenschaften von Dualphasenstählen

Der Dualphasenstahl (im weiteren Verlauf **DP**) gehört zur Gruppe der Advanced High Strength Steels - AHSS. Aus werkstofftechnologischer Sicht ist der DP von Interesse, da dieser eine hohe Zugfestigkeit (hervorgerufen durch die eingelagerten Martensitinseln) mit einer geringen Fließgrenze (der, den Martensit umschließenden, Ferritmatrix geschuldet) kombiniert. Dieses Multiphasenkonzept ermöglicht es, dass die eingebrachten Phasen ihre Eigenschaften im Verbund optimieren [6, 7].

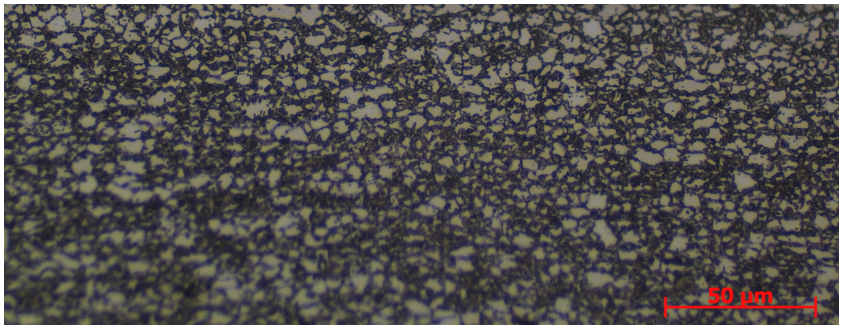


Abbildung 3.1: Schliff DP1000 (Fa.SSAB)

In Abbildung 3.1 sind die Ferritmatrix hell (kaum C, da maximale Kohlenstoffkonzentration von 0.02%) und die eingelagerten Martensitinseln dunkel dargestellt. Dualphasenstähle weisen in der Regel einen 5 % bis 20%-igen Martensitgehalt auf. Die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes werden durch seine Zusammensetzung bestimmt, primär vom Martensitgehalt, siehe Abbildung 3.2.
Weitere Eigenschaften, die Dualphasenstähle besonders im Bereich Automotive interessant erscheinen lassen, sind die früh einsetzende Kaltverfestigung sowie das Ausbleiben einer Lüdersdehnung bei homogener plastischer Verformung, siehe Abbildung 3.3. Letzteres verhindert das Entstehen der charakteristischen Lüdersbänder während Um-

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

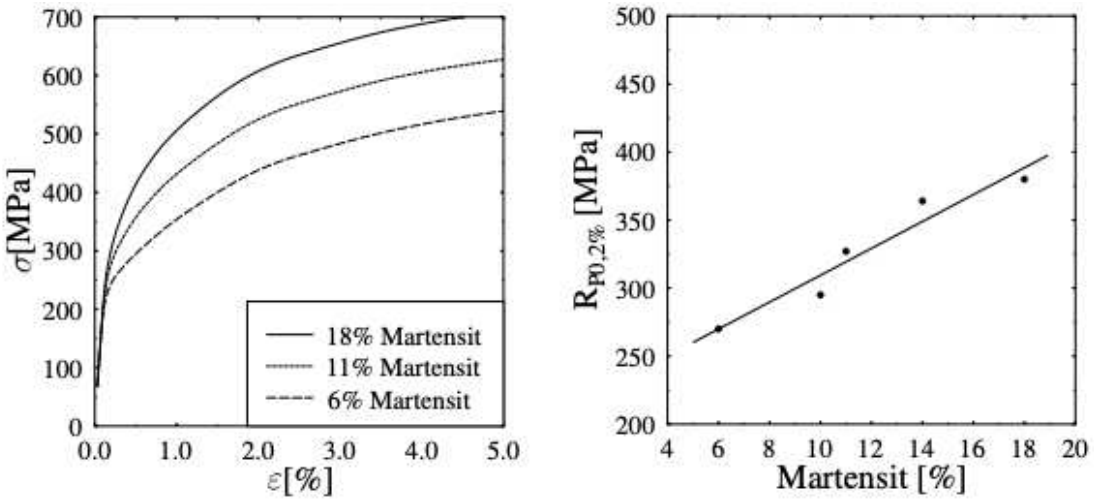


Abbildung 3.2: Mechanische Eigenschaften in Abhängigkeit des Martensit Volumenanteils [6]

formprozessen. Die steigenden Kundenanforderungen betreffend Komfort und Sicherheit können nur dann in Einklang mit strengen Emissionszielen gebracht werden wenn das Gesamtgewicht des Fahrzeuges reduziert wird. Durch Einsatz verschiedener Vertreter der Advanced High Strength Steels lassen sich ebendiese Ziele im Verbund realsieren [8].

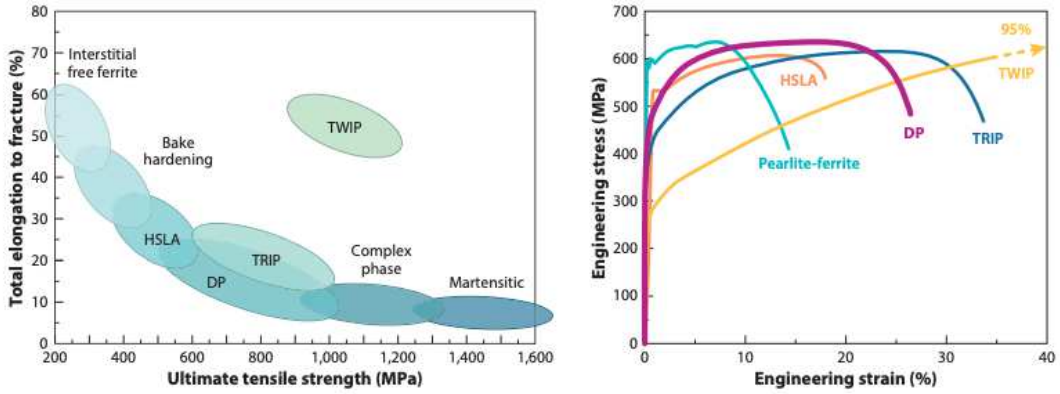


Abbildung 3.3: Mechanische Eigenschaften verschiedener AHHS [9]

3.2 Herstellungsverfahren

Die Notwendigkeit eines homogenen Gefüges, bestehend aus gleichmäßig verteilten Martensitinseln, eingebettet in einer Ferritmatrix, wird mittels kontinuierlichem Glühen eingestellt. Dabei wird das ursprünglich kaltgewalzte ferritisch-perlitische Halbzeug in den interkritischen Bereich ($A_{C1} < T < A_{C3}$) oder das Austenitgebiet ($T > A_{C3}$) gebracht

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

und anschließend unter die Martensitstarttemperatur abgeschreckt. Beide Prozessvarianten sind in Abbildung 3.4 eingezeichnet.
Neben der Wärmeführung während der Produktion beeinflussen die Legierungselemente die werkstofftechnologischen Eigenschaften des Werkstoffes.
Das vorhandene Mangan - *Mn*, ermöglicht eine Mischkristallverfestigung des Ferrit und dient, wie der Kohlenstoff - *C* als Austenitbildner. Dem Gegenüber stehen die sogenannten Ferritbildner, welche ein ferritisches Gefüge bei Raumtemperatur fördern und das γ-Gebiet stark einschränken. Zu dieser Gruppe gehören die Legierungsbestandteile Chrom - *Cr*, Aluminium - *Al*, Titan - *Ti*, Silicium - *Si*, Molybdän - *Mb*. Die Zugabe von Niob - *Nb* fördert, wie Titan, die Entstehung eines feinkörnigen Gefüges.

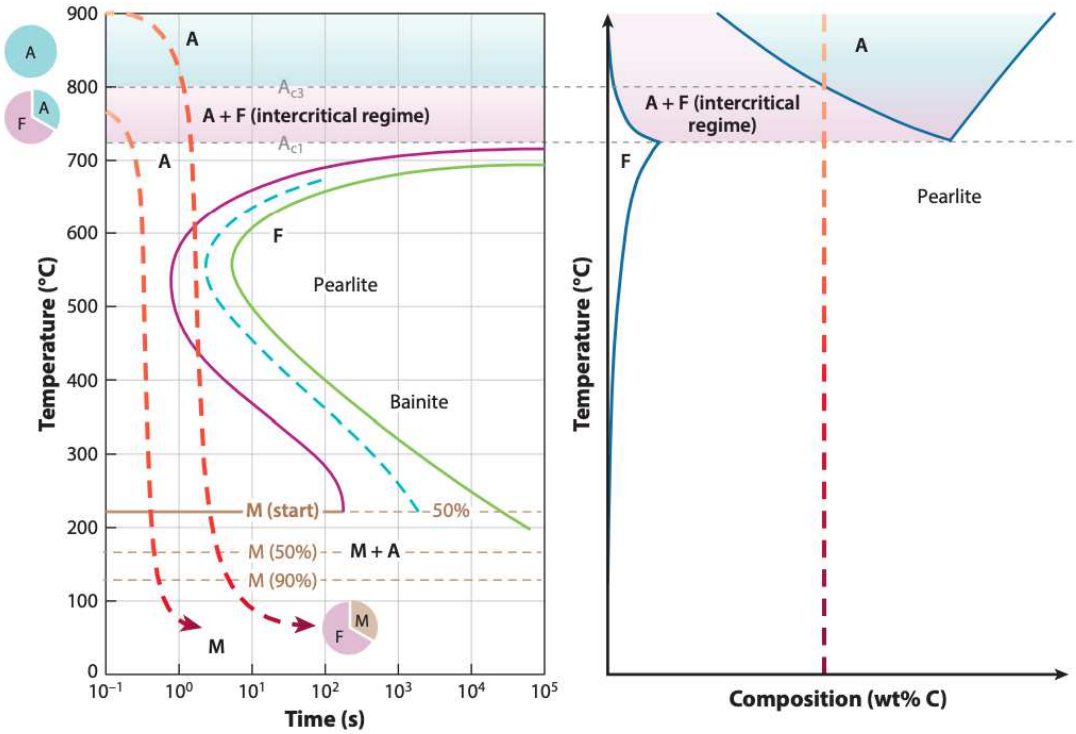


Abbildung 3.4: Wärmeführung zur Einstellung eines gleichmäßigen DP-Gefüges [9]

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

3.3 Wärmebehandlung von Stahl

Der Fertigungszustand von Halbzeugen und Bauteilen aus Stahl ist in den meisten Fällen nicht kongruent mit den Erfordernissen des Verwendungszweckes. Somit ist eine Anpassung der Eigenschaften mittels Wärmebehandlung notwendig, um Anforderungen wie Festigkeit, Duktilität oder Verschleißfestigkeit zu gewährleisten.
Nach DIN EN 10052 versteht man unter einer Wärmebehandlung *"...ein Werkstück ganz oder teilsweise Zeit-Temperatur-Folgen zu unterwerfen, um eine Änderung seiner Eigenschaften und/oder seines Gefüges herbeizuführen"*. Wärmebehandlungsverfahren unterscheiden sich primär durch ihre Zeit-Temperatur-Folge. Abbildung 3.5 zeigt den schematischen Ablauf einer konventionellen Wärmebehandlung.

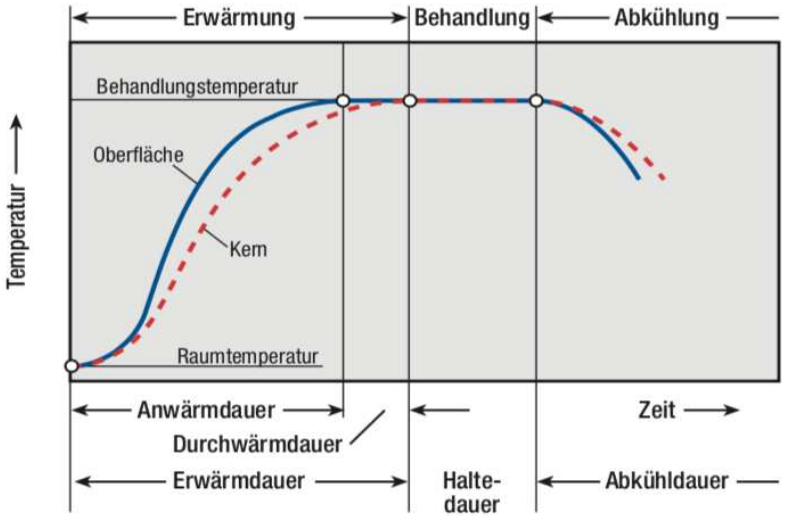


Abbildung 3.5: Schematische Wärmebehandlung

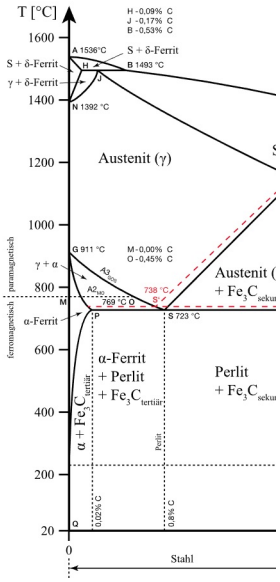
Diese umfasst das Erwärmen des Bauteils auf die definierte Temperatur, anschließendes Halten ebendieser, gefolgt von kontrollierter Abkühlung. Für diese Arbeit ist das Härten und Anlassen von Interesse.

Härten

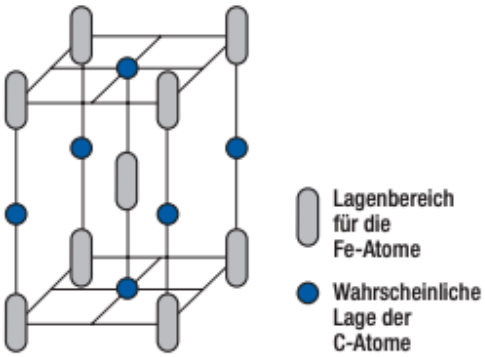
Die Härte ist jener mechanische Widerstand, den ein Körper einem anderen eindringenden Körper entgegensetzt. Grundlegend für dieses Konzept ist die $\gamma(kfz) \leftrightharpoons \alpha(krz)$ Umwandlung bei Austenitisierungstemperatur respektive die Abkühlgeschwindigkeit aus dem Austenitgebiet (γ). Niedrige Abkühlgeschwindikgeiten (v_{ab}) ermöglichen die Bildung eines ferritischperlitischen Grundgefüges unterhalb von A_1 (in Abhängigkeit von v_{ab} entsteht fein- (Sorbit) bis feinststreifiger (Troostit) Perlit), welches durchschnittliche

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

mechanische Eigenschaften aufweist. Die maximale Löslichkeit von Kohlenstoff liegt bei kubischflächenzentrierten (γ) Stählen bei $2,06\%$ (siehe Abbildung 3.6a).



(a) Ausschnitt FeC - Diagramm



(b) tetragonal verzerrtes Gitter

Abbildung 3.6: Gleichgewichtsschaubild & Martensitgitter

Im Gegensatz dazu kann kubischraumzentriertes (α) Eisen lediglich einen Bruchteil des Kohlenstoffs lösen ($0,02\%$). Wird v_{ab} gesteigert, so tritt ab einer werkstoffabhängigen Temperatur (Martensitstarttemperatur) M_S die Martensitbildung ein. Die Entstehung des Martensit ist zeitunabhängig und lediglich von der Unterkühlungsrate abhängig. Aufgrund der Löslichkeitsunterschiede bleibt der im Austenit gelöste Kohlenstoff im Mischkristall zwangsgelöst, verursacht eine tetragonale Verzerrung, und es entsteht Martensit, dessen Gitteraufbau in Abbildung 4.6d ersichtlich ist. Ziel ist es dabei ein martensitisches Gefüge im definierten Werkstückbereich zu erzeugen, welches sich durch eine hohe Härte und Verschleißfestigkeit auszeichnet.

Anlassen

Nach DIN EN 10052 ist unter Anlassen das Erwärmen auf Temperaturen $T \leq A_{c1}$ zu verstehen. Dabei werden aus dem Martensit Kohlenstoff in Form von Karbiden ausgeschieden sowie Versetzungen aufgebaut. Es kommt dabei zur Reduktion der Härte und somit zu einer Duktilitätssteigerung.

$T \leq 250°C$ Ausscheidung von ϵ - Karbiden verursacht eine Reduktion der Gitterverzerrung und damit einen Härteabfall

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

$T \leq 280°C$ Restaustenit zerfällt zu Martensit während Abkühlung auf RT

$T > 260°C$ Umwandlung von ϵ - Karbiden in Zementit

$T \geq 450°C$ Bei höher legierten Werkstoffen mit Karbidbildnern werden Sonderkarbide gebildet, und die Zusammensetzung vorhandener Karbide verändert sich.

Bei der Wärmebehandlung mittels Laserbestrahlung wird gezielt die Randschicht verändert. Die Zeit-Temperatur-Folge ähnelt jener in Abbildung 3.5, jedoch ist die Aufwärmzeit viel geringer, die Haltedauer geht gegen 0, und das Abkühlen rührt von der Selbstabschreckung des bestrahlten Bauteils her. Eine ausführliche Beschreibung des Laserumwandlungshärtens wird nachfolgend angeführt.

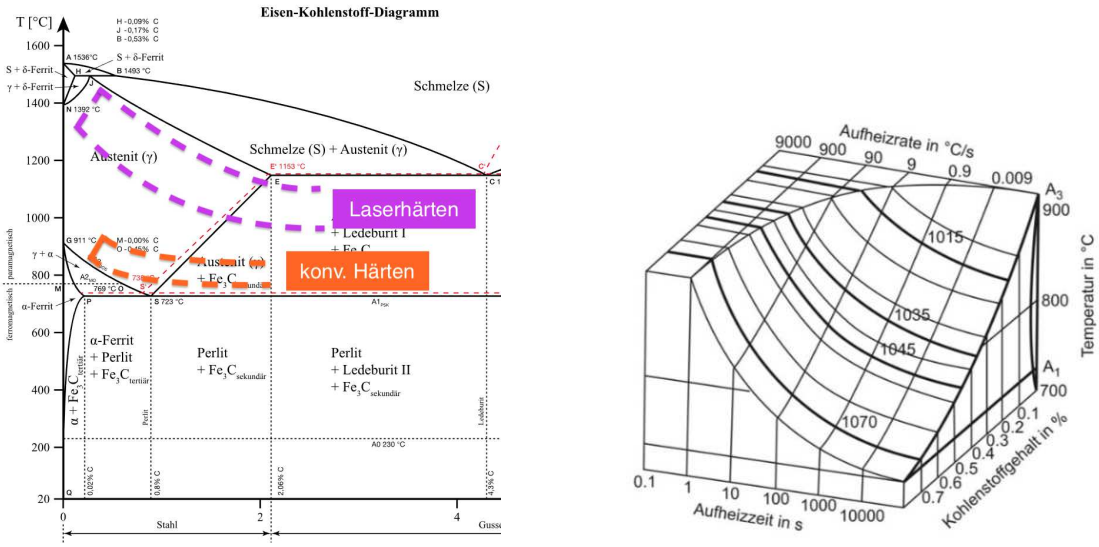
3.4 Laserumwandlungshärten

Mittels Laserumwandlungshärten werden harte und verschleißfeste Randschichten im Milimeter- und Zehntelmilimeterbereich erzeugt. Im Vergleich zum konventionellen Härten, bei dem das gesamte Bauteil über die Austenitisierungstemperatur erwärmt und anschließend abgeschreckt wird, wird beim Laserumwandlungshärten das Bauteil lediglich an der Oberfläche erhitzt. Das Abkühlen wird durch das sogenannte Selbstabschrecken vom umgebenden, nahezu unerwärmten Bauteil, welches als Wärmesenke fungiert, übernommen. Die Wärmeleitung findet dabei mittels Konduktion statt, was weit höhere Abkühlgeschwindigkeiten als eine konventionelle Wasserabschreckung (bei dieser ist die Dampfbildung der limitierende Faktor) ermöglicht. Daraus ergeben sich folgende Unterscheidungsmerkmale:

- Oberflächentemperatur wird beim konventionellen Härten minimiert ($T_{maxSurf} \geq A_{C3}$), um den Verzug und die eingebrachte Wärme in das Bauteil zu reduzieren
- Oberflächentemperatur beim Laserumwandlungshärten wird maximiert (Anschmelzen der Oberfläche muss verhindert werden, $T_{maxSurf} < T_{solidus}$)
  - steiler Temperaturgradient ist notwendig um Umwandlungsvorgänge in reduzierter Prozessdauer durchführen zu können
  - Hohe Aufheizraten und niedriger Kohlenstoffgehalt verschieben A_{C3} hin zu höheren Werten, siehe Abbildung 3.7b

Die Vorteile des Laserhärtens sind zusammenfassend gegeben durch die Möglichkeit, eine Vielzahl an (auch kohlenstoffarmen) Stähle zu härten und dabei die Ausbreitung der Wärmeeinflusszone lokal zu begrenzen. Die lokal begrenzte Wärmeeinbringung kann,

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN



(a) Temperaturbereich Laserumwandlung im Vergleich zu konventionellem Härten

(b) A_{C3} in Abhängigkeit von Aufheizrate und Kohlenstoffgehalt

Abbildung 3.7: Temperatureigenschaften während der Laserwärmebehandlung

wenn die Prozessführung hin zu großflächigen Wärmebehandlungsbereichen ausgelegt ist, durch die Strahlführung angepasst werden. Im Gegensatz dazu können die Anschaffungskosten den Einsatz in Kleinserien sehr kostenintensiv werden lassen, was in den meisten Fällen nicht durch die Zeitersparnis während des Härtevorgangs kompensiert werden kann [10].

Das Laserumwandlungshärten von Dünnblechen, wie sie in dieser Versuchsführung verwendet wurden, ist im Vergleich zum Härten von großvolumigen Bauteilen, wesentlich komplexer. Je mehr umgebendes Material vorhanden ist, desto eher kann dieses die eingebrachte Wärme abführen und sich selbstabschrecken.

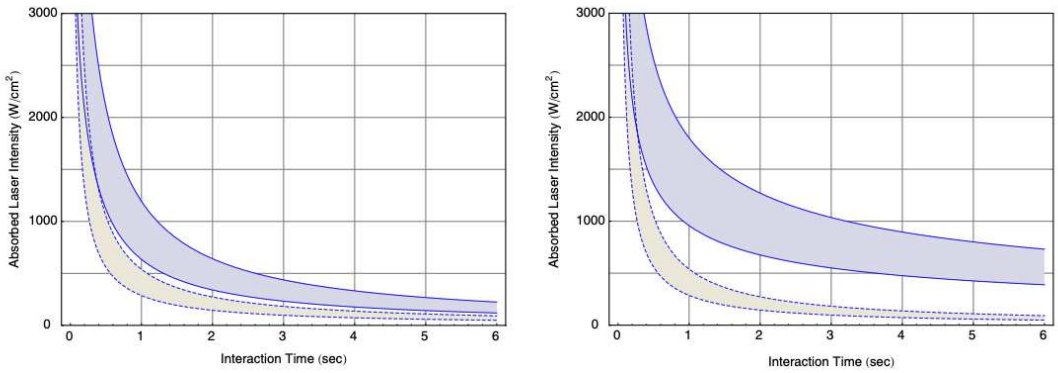
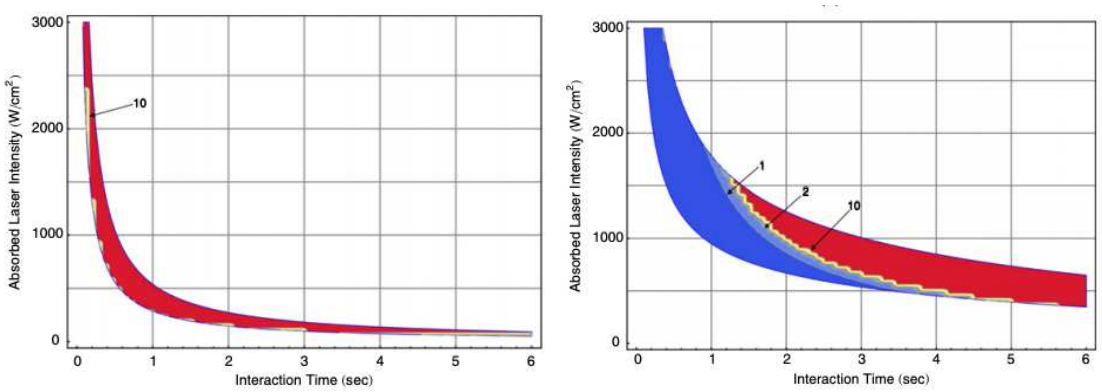


Abbildung 3.8: Einfluss der Probendicke, links Blechdickenreduktion von 2.5mm (blau) auf 1mm, rechts Reduktion von 10mm (blauf) auf 1mm [11]

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

Abbildung 3.8 zeigt, dass bei dünnen Blechen die Interaktionszeit sich bei hinreichend großen Leistungsdichten hin zu kleinen Werten verschiebt. Untersuchungen zeigen, dass bei dünnen Proben dem Kohlenstoff ausreichend Zeit zur Diffusion zur Verfügung steht. Dünne Bleche werden bei unangepasster Prozessführung durcherwärmt, und die notwendigen Unterkühlung kann nicht stattfinden. In Abbildung 4.1 sind die Abkühlgeschwindigkeiten, notwendig für das Eintreten der Martensitbildung, visualisiert.



(a) 1mm (b) 1cm

Abbildung 3.9: Effektive Abkühldauer in Abhängigkeit der Plattendicke [11]

Es zeigt sich, dass bei einer Blechstärke von 1mm (Abbildung 3.9a) kaum noch materialimmanente Abschreckungskapazitäten im Prozessfenster vorhanden sind. Im Vergleich dazu ist bei einer Blechstärke von 1cm (Abbildung 3.9b) eine ausreichend große Parametervariation möglich [11]. Im Allgmeinen muss im Dünnblechbereich ein Trade-Off zwischen Maximierung der Oberflächentemperatur weit oberhalb von A_{C3} und der Reduktion der Wärmeeinbringung für eine mögliche Selbstabschreckung gefunden werden. Ein enges Prozessfenster ist bei diesem Verfahren unabdingbar.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

4 Versuchsführung und Auswertung

Die sich durch die Parametervariation einstellenden Qualitätsmerkmale, welche für die statistische Versuchsführung bekannt sein müssen, werden nachfolgend ausgewertet. Die physikalischen Grundlagen und Methoden der dafür verwendeten Messverfahren sollen erläutert werden, um die Nachvollziehbarkeit der Messergebnisse zu gewährleisten. Die Versuche wurden in einem engen Prozessfenster gehalten. Die Definition und Kodierung des Prozessfensters werden im Kapitel 6 erläutert. Nachfolgend sollen jedoch die Maxima und Minima der variierenden Parameter angeführt werden, um die Übersichtlichkeit der Arbeit zu gewährleisten. Der verwendete Dualphasenstahl liegt in einem blechförmigen Zustand mit folgenden Abmessungen vor $60mm \times 25mm \times 1.6mm$ (l × b × h).

Parameter	−	+
Leistung [P]	320W	480W
Vorschub [v]	20 $\frac{mm}{s}$	30 $\frac{mm}{s}$
Fokuslage [f]	30mm	35mm

Tabelle 4.1: Zusammenfassung Prozessfenster

4.1 Werkstoffeigenschaften

Für sämtliche analytische Auswertungen im Bereich Wärmeleitung ist Kenntnis über die thermischen Materialeigenschaften notwendig. Nachfolgend werden Werte für den Dualphasenstahl definiert, die für die Berechnungen herangezogen werden. Es finden sich wenige thermische Eigenschaften, die einzig der DP1000-Stahlsorte zugeordnet werden können, da noch nicht ausreichend Untersuchungsergebnisse vorliegen.

DP1000 - chem. Zusammensetzung (Maximalwerte)									
C	Si	Mn	P	S	Al	Nb+Ti	Cr + Mo	B	Cu
0.23	1.00	2.7	0.05	0.01	0.015 - 1	0.15	1.0	0.005	0.2

Tabelle 4.2: Chemische Zusammensetzung [12]

Dahingehend wurden bei unbekannten Werten Charakteristika von Stahlsorten herangezogen, die dem verwendeten Material betreffend chemischer Zusammensetzung und

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

mechanisch-technologischer Eigenschaften stark ähneln, siehe Tabelle 4.2. Die für diese Arbeit besonders wichtige Austenitisierungstemperatur A_{C3} wurde für artgleiche Stähle numerisch bereits ermittelt und kann somit herangezogen werden [13].

Wärmeleitfähigkeit	K	40	$\frac{W}{mK}$
Temperaturleitfähigkeit	κ	12	$\frac{mm^2}{s}$
thermische Diffusionslänge	δ	$2\sqrt{\kappa t}$	mm
Blechstärke	h	1.6	mm
Austenitisierungstemp.	A_{C3}	879	°C

Tabelle 4.3: Materialeigenschaften

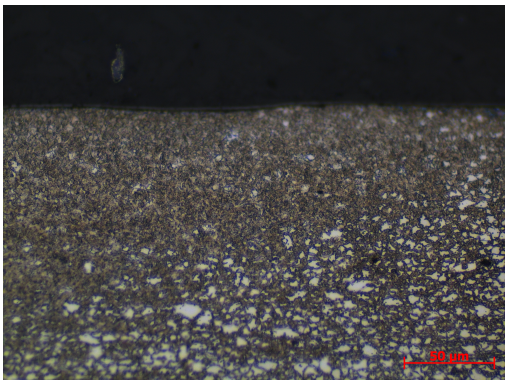
4.2 Metallographische Auswertung

Die Wärmebehandlung der Randschicht führt unweigerlich auch zu einer Beeinflussung der umliegenden Werkstoffbereiche. Untersucht wurde Probe DoE2, da hier eine stark ausgeprägte Wärmeeinflusszone, aufgrund der Prozessführung, zu erwarten war. Die Ätzung wurde mittels 5%-iger Nitallösung durchgeführt, um die Ausdehnung des umwandlungsgehärteten Bereichs zu analysieren. Nachfolgend sind 2 Vergrößerungsstufen der analysierten Probe angeführt. In Bild 4.1a ist deutlich zu erkennen, dass eine Umwandlungshärtung stattgefunden hat. Es liegt ein nahezu rein martensitischer Bereich im Werkstück vor, der durch die dunkle Färbung (aufgrund höherer Kohlenstofflöslichkeit des Martensit im Vergleich zu Ferrit) erkennbar ist. Anschließend wurde Abbildung 4.1b herangezogen, um die Tiefe des gehärteten Bereichs mittels ImageJ auszuwerten. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.4 zusammengefasst.

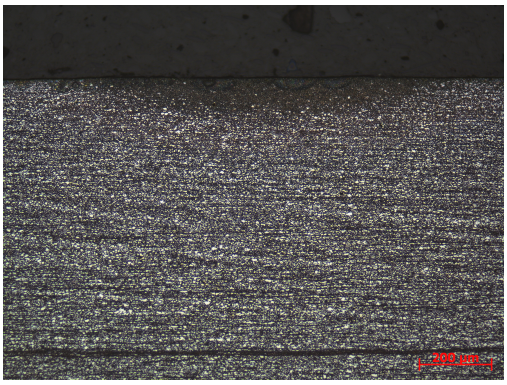
Charakteristika	Nominalleistung	P_{nom}	480	W
	Intensität	I_{nom}	$1.91 \cdot 10^8$	$\frac{W}{m^2}$
	Strahlradius	w	0.8944	mm
	Härtetiefe	z	0.14	mm
	Interaktionszeit	$t_i \approx \frac{d}{v}$	0.09	sec

Tabelle 4.4: Auswertung DoE2

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub



(a) 50-fache Vergrößerung



(b) 10-fache Vergrößerung

Abbildung 4.1: Metallografischer Schliff der Probe DoE2

4.3 Temperaturmessung

Das Erfassen der Temperaturverhältnisse während der Bestrahlung ist jenes Vorhaben, welchem mitunter die größte Wichtigkeit zuzuordnen ist. Die eingekoppelte Energie in das Werkstück kann nicht direkt ermittelt werden sondern muss, unter zu Hilfenahme bereits getroffener Annahmen, über die Maximaltemperatur während der Wärmebehandlung rückgerechnet werden.
Ein weiterer Aspekt, der zu berücksichtigen ist, ist, dass die höchsten Temperaturen in der Mitte des Laserstrahls auftreten und somit ebenfalls nicht direkt messbar sind. Die Messung mittels Pyrometer würde keine ausreichend genauen Ergebnisse liefern da der Absorptionsgrad nicht bekannt ist, und dieser im Zuge der Parametervariation starken Unterschieden unterliegen würde. Unter Berücksichtigung der eingeschränkten Mess-

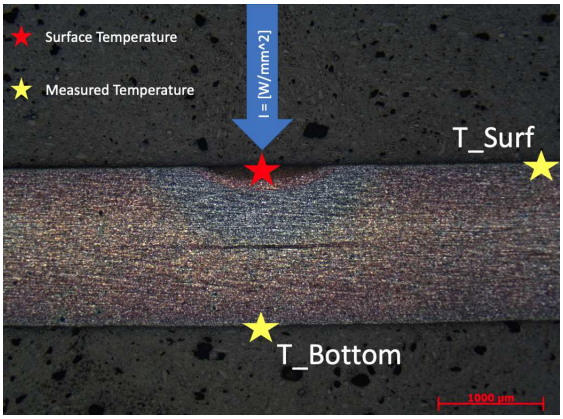


Abbildung 4.2: Möglichkeiten der Temperaturmessung

möglichkeiten, lässt die Problemstellung lediglich eine Ermittlung der Temperatur an

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

der Probenoberseite mit ausreichendem Abstand zum Laserstrahl oder an der Probenunterseite in der verlängerten Laserstrahlachse zu, siehe Abbildung 4.2. Zieht man die Oberflächentemperatur als Startpunkt für weitere Analysen in Betracht, so muss beachtet werden, dass dies eine Lösung einer mehrdimensionalen Wärmeleitungsgleichung erfordert. Der analytische Aufwand wäre für eine Grundlagenanalyse des Absorptionsgrades nicht zielführend. Stattdessen wird in dieser Arbeit die Probenunterseitentemperatur als Randbedingung für weitere Überlegungen herangezogen. Dadurch wird die Möglichkeit geschaffen, schrittweise über ein eindimensionales Wärmeleitungsproblem die Laserwärmebehandlung zu beschreiben.

4.3.1 Grundlagen der Thermoelemente

Die Wärme repräsentiert die innere Energie eines Körpers, verursacht durch Bewegung von Atomen und Molekülen. Die Temperatur, unter Berücksichtigung weiterer Materialeigenschaften, beschreibt den Energiegehalt des betrachteten Körpers. Da die innere kinetische Energie eines Körpers nicht direkt ermittelt werden kann, werden zur Temperaturmessung die durch Wärme beeinflussten physikalischen Effekte erfasst [14, S. 11].

Seebeck Effekt

Thermoelemente nutzen den sogenannten Seebeck Effekt zur Temperaturmessung. Eine Temperaturdifferenz entlang eines metallischen Körpers verursacht Ladungsverschiebungen. Diese Ladungsverschiebungen sind abhängig von den Materialkonstanten und den vorherrschenden Temperaturbedingungen. Verbindet man zwei unterschiedliche metallische Drähte miteinander und setzt diese einer Temperatur aus, die sich von jener an den freien Enden unterscheidet, so stellt sich an diesen eine Spannung ein. Diese von Materialeigenschaften und Temperatur abhängige Spannung wird als Thermospannung bezeichnet. Zu berücksichtigen ist, dass nur Temperaturdifferenzen gemessen werden

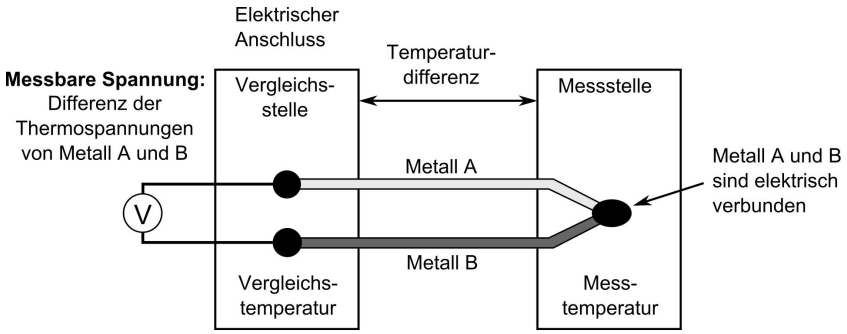


Abbildung 4.3: Prinzipskizze der Messschaltung

können, die Vergleichstemperatur wird durch eine Kaltstellenkompensation im Messver-

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

stärker bereitgestellt und zur gemessenen Differenz addiert, um einen Absolutwert zu generieren. Anschlussklemmen und Ausgleichsleitungen müssen identische thermoelektrische Eigenschaften aufweisen wie das Thermoelement. Sämtliche Temperaturmessungen in dieser Arbeit wurden mittels Thermoelementen des Typs K ermittelt. Bei Typ K Thermoelementen wird ein Nickel-Chrom-Draht mit einem Nickel-Draht verbunden, dabei lassen sich Maximaltemperaturen bis 1200 Grad Celsius abbilden. Da sich die entstehenden Spannungen, siehe Abbildung 4.4, im Milivoltbereich bewegen und teilweise nicht lineares Verhalten aufweisen, ist es notwendig, einen Messverstärker zu verwenden.

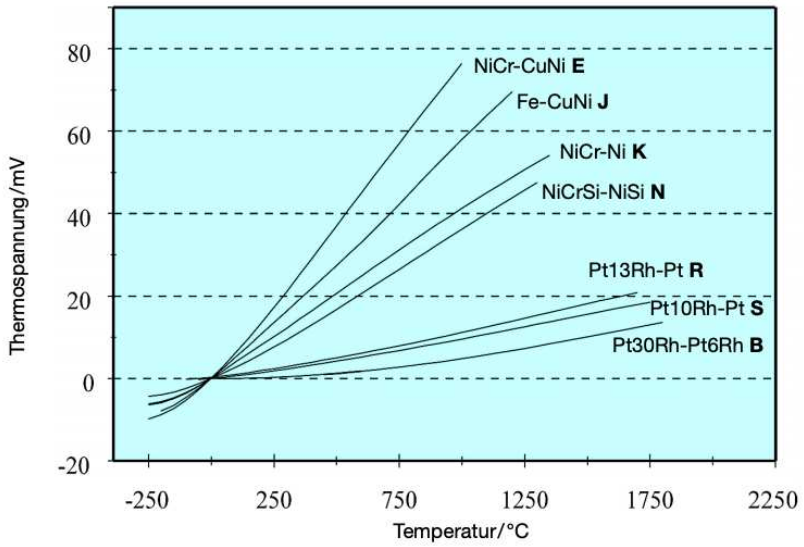
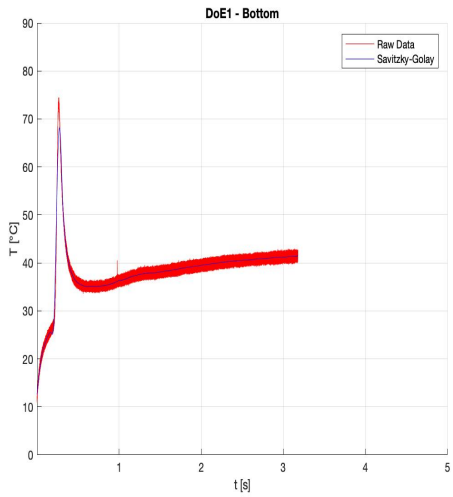


Abbildung 4.4: Kennlinien von Thermoelementen nach DIN EN 60 584

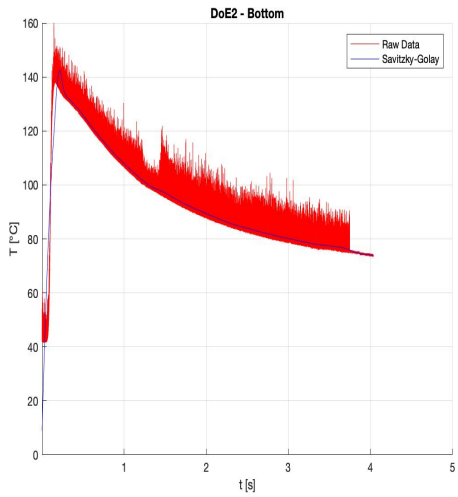
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

4.3.2 Auswertung Maximaltemperatur

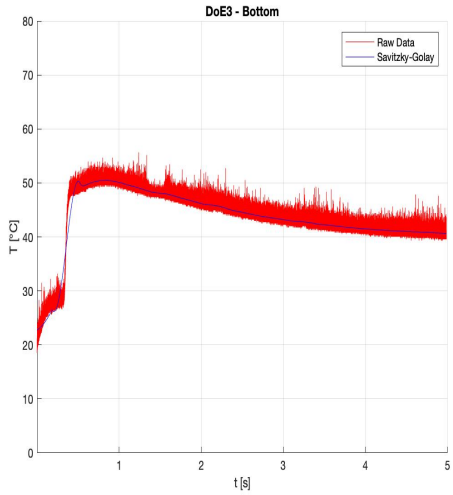
Die Temperaturen wurden, wie beschrieben, mittels Thermoelementen aufgenommen, eine Signalverstärkung wurde durchgeführt und die Thermospannung mittels LABVIEW aufgezeichnet. Anschließend wurden die Daten mittels MATLAB R2017b bearbeitet. Es wurde eine Glättung nach Savitzky - Golay durchgeführt (genaue Auswertungen sind im Anhang vorhanden). Um die Ergebnisse effektiv analysieren und vergleichen zu können, wurden einheitlichd die geglätteten Maximaltemperaturen für weitere Berechnungen herangezogen. Das ungefilterte Messergebnis ist in nachfolgenden Abbildungen rot dargestellt.



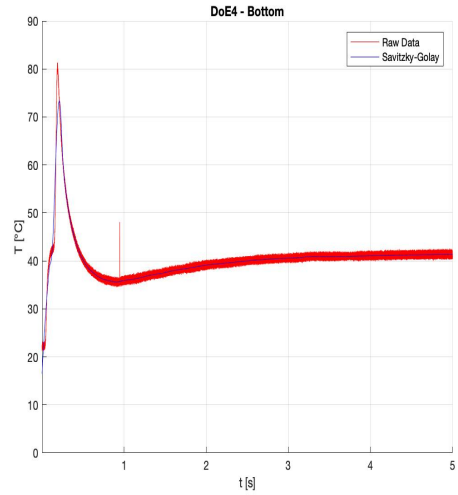
(a) DoE1



(b) DoE2



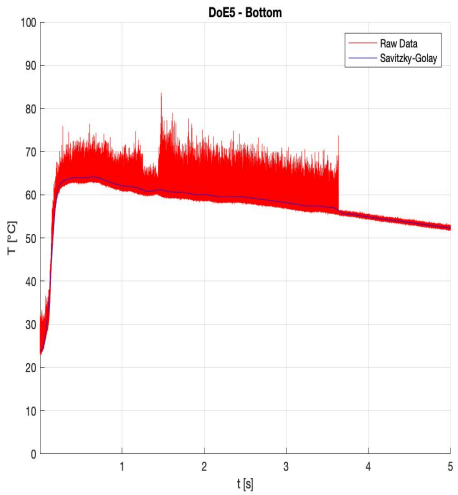
(c) DoE3



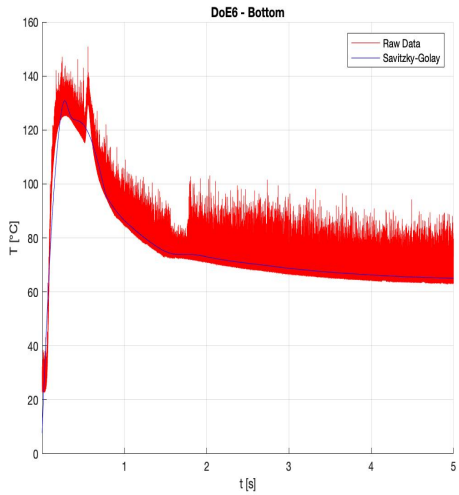
(d) DoE4

Abbildung 4.5: Temperaturauswertung DoE1 - DoE4

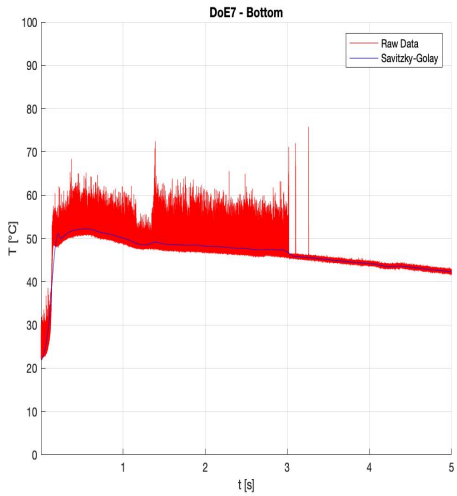
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN



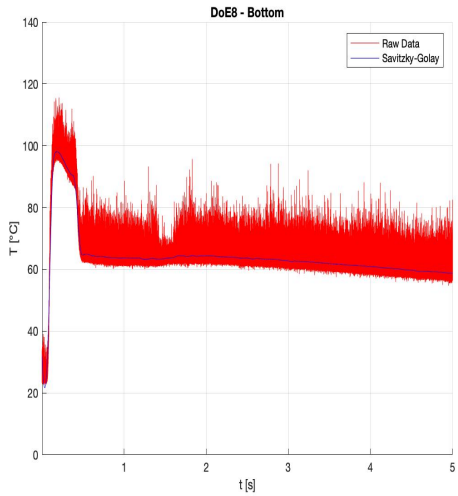
(a) DoE5



(b) DoE6



(c) DoE7



(d) DoE8

Abbildung 4.6: Temperaturauswertung DoE5 - DoE8

4.4 Härtemessung nach Vickers

Die Härtemessung nach Vickers wird mittels EN ISO 6507-1:2018 beschrieben. Das Verfahren wurde in den 1920er Jahren entwickelt und bietet den Vorteil, dass alle Härtegrade, auch im Randschichtbereich, vermessen werden können. Abbildung 4.8 zeigt den Eindringkörper, bestehend aus einer geraden Diamantpyramide mit quadratischer Grundfläche, und dessen Abdruck im zu prüfenden Werkstück.

Die Vickers Härte errechnet sich aus dem Quotienten der Prüfkraft und der Oberfläche des Eindrucks, nach folgender Gleichung:

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

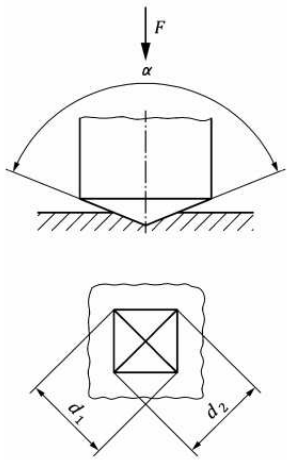


Abbildung 4.7: Prüfprinzip nach Vickers

$$HV = \frac{1}{g}\,\frac{2F\,sin(\frac{\alpha}{2})}{d^2} \approx 0.1891 \cdot \frac{F}{d^2} \tag{4.1}$$

Das zu prüfende Werkstück muss dabei eine Mindestdicke von eineinhalb Mal der Eindruckdiagonale aufweisen. Eine rückseitige Verformung, hervorgerufen durch die Härtemessung, ist nicht zulässig. In der DIN EN ISO 6507-1:2018-07 (Anhang A1) ist die Mindestdicke der Proben in Abhängigkeit der Prüfkraft und Härte visualisiert.

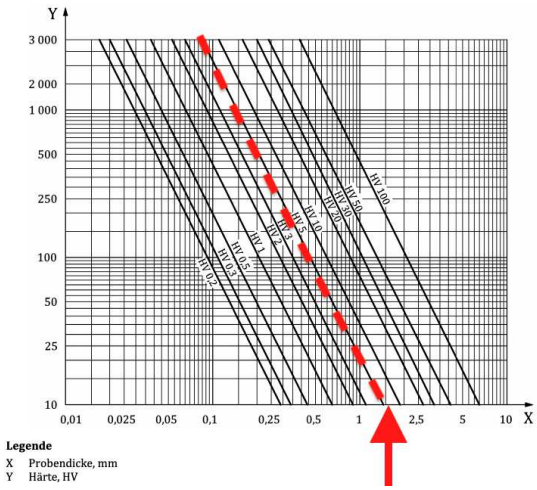


Abbildung 4.8: Mindestdicke in Abhängigkeit der Prüfkraft

Für die Prüfkörper mit einer Dicke von 1.6mm sind somit Prüfkräfte bis zu 49.03N (HV5) zulässig. Da eine Analyse der wärmebehandelten Oberfläche durchzuführen ist, würden HV5 Messungen mit Eindrücken erzeugen, deren Ausdehnungen jene der Här-

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

tespur übersteigen würden. Weiters ist bei normgerechter Durchführung nach DIN EN ISO 6507-1:2018-07 der Mindestabstand zwischen einzelnen Messungen einzuhalten. Bei großen Eindrücken sind die Abstände somit ebenfalls weiter von einander entfernt, und somit ist eine Auswertung von Härtespuren mit wenigen Millimetern Breite unmöglich.

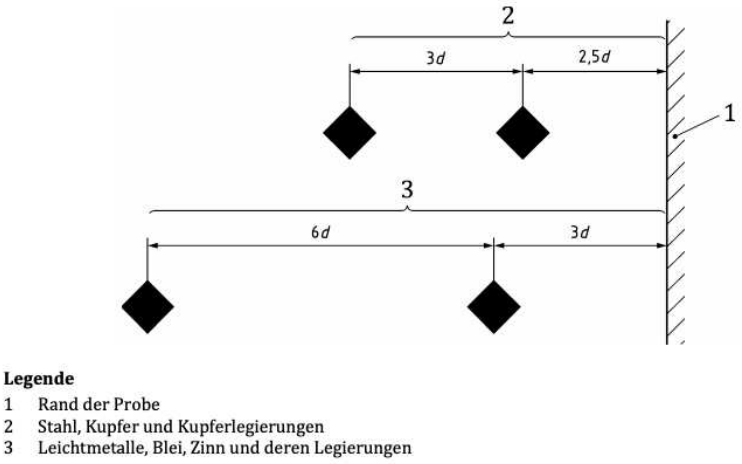


Abbildung 4.9: Mindesstabstand der Eindrücke

Um einen Verlauf der Wärmeeinflusszone abbilden und vermessen zu können, ist es notwendig, die Prüfkraft soweit zu reduzieren, dass die erzeugten Eindrücke in einer Größenordnung liegen, welche es erlaubt, mehrere Messungen in die Härtespur zu legen und auszuwerten. Für die Auswertung der Laserwärmebehandlung wurde eine Prüfkraft im Kleinkraftbereich mit 4.903N (HV0.5) gewählt.

4.4.1 Auswertung Oberflächenhärte

Die Härtemessung wurde normal zur Laserhärtespur in 0.2mm Abständen durchgeführt, wie in Bild 4.10 ersichtlich ist. Es wurde eine Härteprüfmaschine der Firma MTL Prüf-

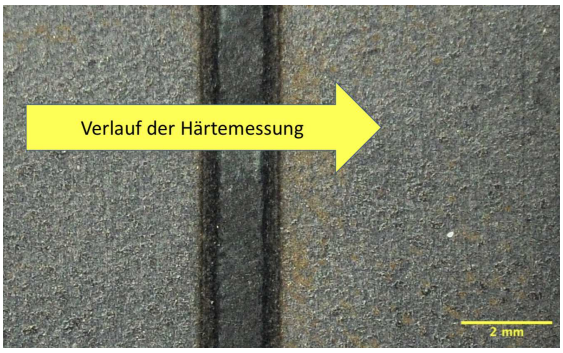
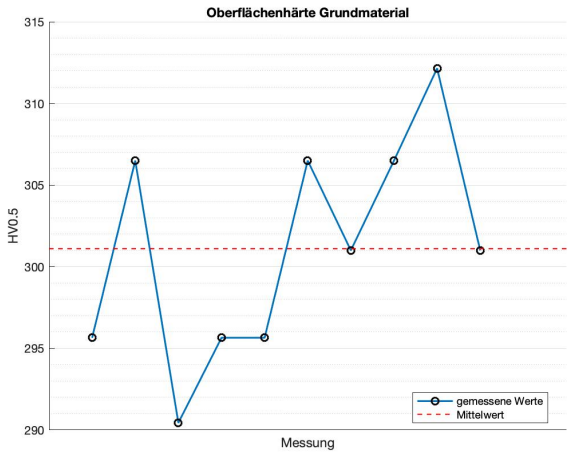


Abbildung 4.10: Verlauf der Oberflächenhärtemessung

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

systeme verwendet, um die Eindrücke im zugrundeliegenden Probenkörper mit definierter Prüfkraft zu erzeugen. Die vorliegenden Eindrücke wurden anschließend mit einem Mikroskop der Firma Reichert und einer Nikon D90 erfasst. Die einzelnen Aufnahmen wurden anschließend digital mit dem Bildverarbeitungsprogramm ImageJ vermessen. Die gemessenen Diagonalen führen mittels Formel 4.1 zu den jeweiligen Härtewerten. Eine symmetrische Ausdehnung der Härtespur erlaubt es, die ermittelten Messpunkte zu spiegeln.
Um einen Vergleichswert zu erhalten, wurden an einer unbehandelten Probe mehere Messpunkte gesetzt und deren Härte ausgewertet. Diese Werte wurden arithmetisch gemittelt, um einen Referenzwert für weitere Analysen festzulegen, die dabei verwendete Prüfkraft lag bei $4.903N$, was einer Messung nach HV0.5 entspricht.



Nr.	Härte [HV0.5]
1	295.65
2	306.5
3	290.44
4	295.65
5	295.65
6	306.50
7	301.00
8	306.50
9	312.15
10	301.00
∅	301.10

Abbildung 4.11: Mittlere Oberflächenhärte des Grundmaterials

Nachdem eine mittlere Härte vorliegt, wurden die bestrahlten Proben untersucht und die Auswirkung der Wärmebehandlung analysiert. Folgende Messwerte wurden ermittelt:

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

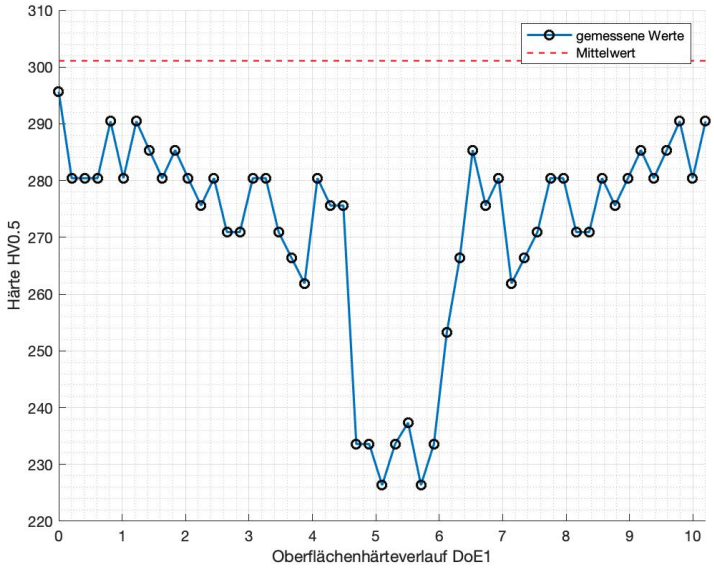


Abbildung 4.12: Gemessene Oberflächenhärte DoE1

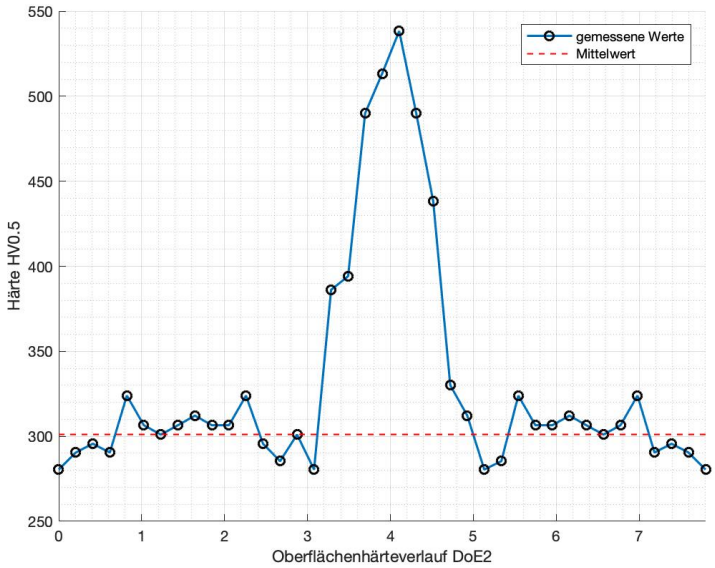


Abbildung 4.13: Gemessene Oberflächenhärte DoE2

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

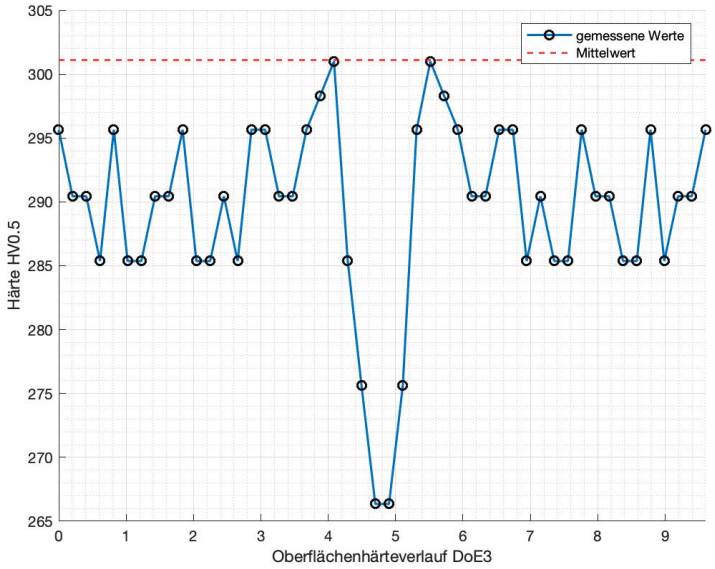


Abbildung 4.14: Gemessene Oberflächenhärte DoE3

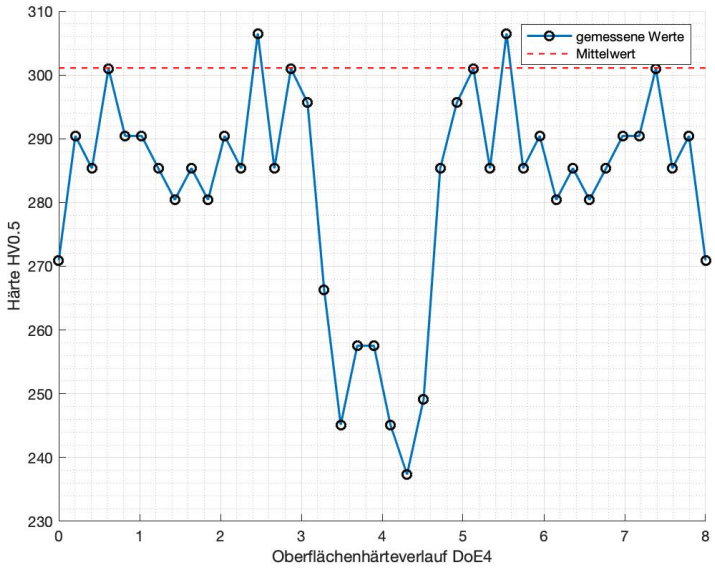


Abbildung 4.15: Gemessene Oberflächenhärte DoE4

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

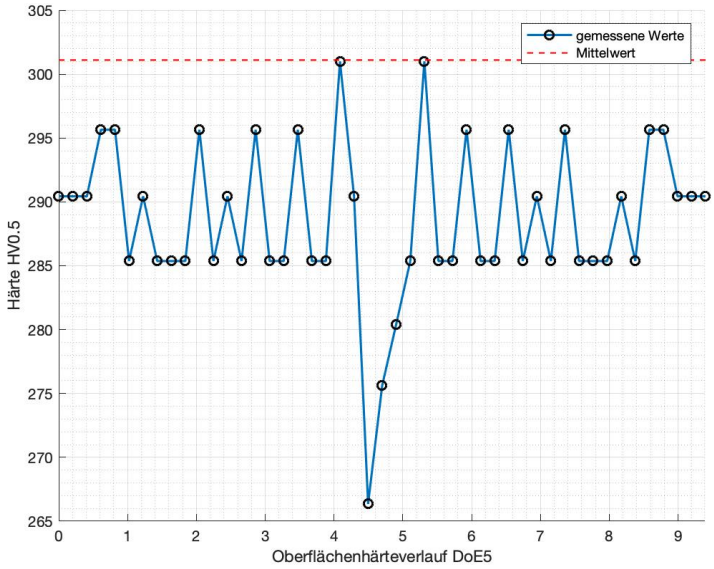


Abbildung 4.16: Gemessene Oberflächenhärte DoE5

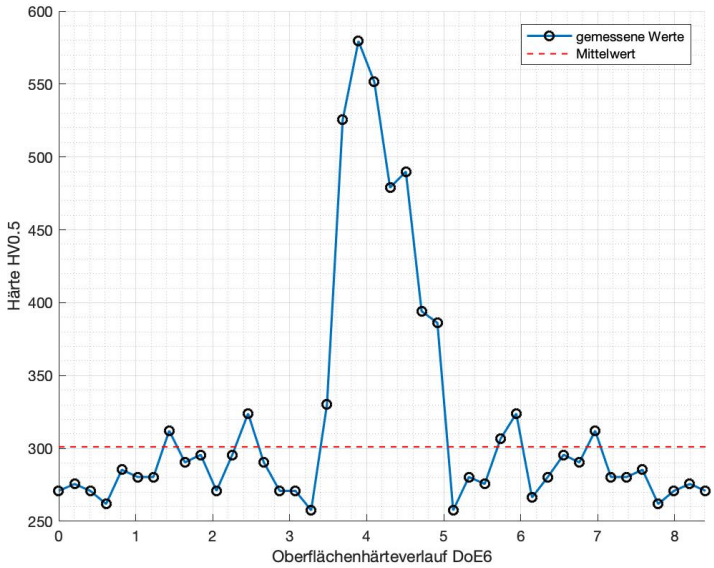


Abbildung 4.17: Gemessene Oberflächenhärte DoE6

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

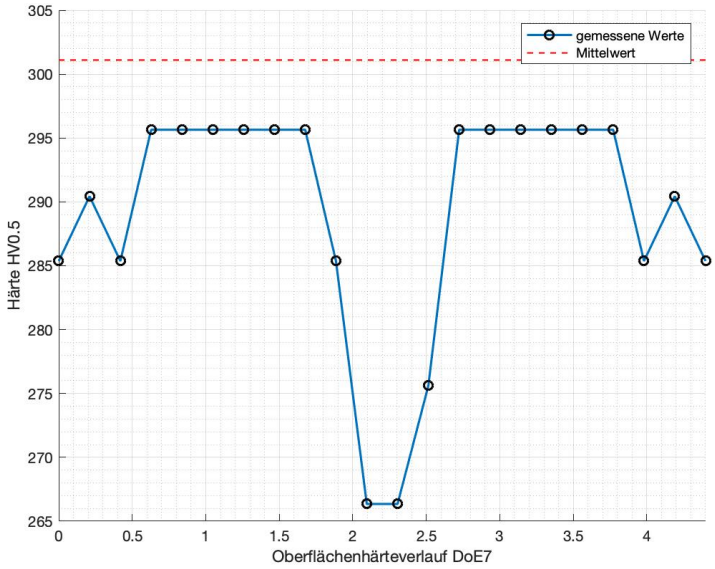


Abbildung 4.18: Gemessene Oberflächenhärte DoE7

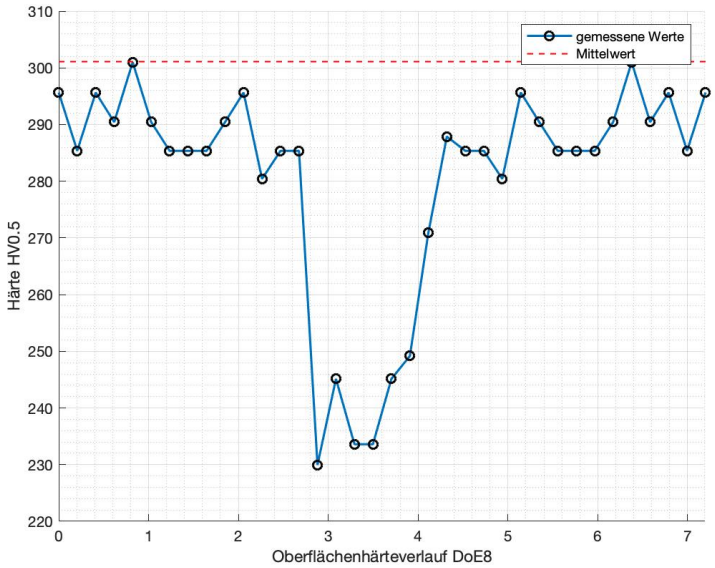


Abbildung 4.19: Gemessene Oberflächenhärte DoE8

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

4.4.2 Härteverlauf über Probendicke

Der beschriebene Temperaturverlauf im Körper kann mittels Härtemessung visualisiert und für eine Plausibilitätsüberprüfung herangezogen werden. Es wurde die Probe des Versuchslaufes DoE2 herangezogen, da hier definitiv die Austenitisierungstemperatur A_{C3} erreicht wurde. Aufgrund der geringen Dicke von 1.6mm wurde der Prüfling warmeingebettet, um das Handling während der Untersuchung zu verbessern. Die Probenhärte wurde mittels eines Kleinkrafthärteprüfgeräts der Firma Emco M1C 010 und einer Prüfkraft von 2.942N (HV0.3) ermittelt. Die Mindestabstände der Eindrücke zueinander wurden nach DIN EN ISO 6507-1:2018-07, siehe Abbildung 4.9, eingehalten. Die visualisierten Messergebnisse können nachfolgender Abbildung entnommen werden:

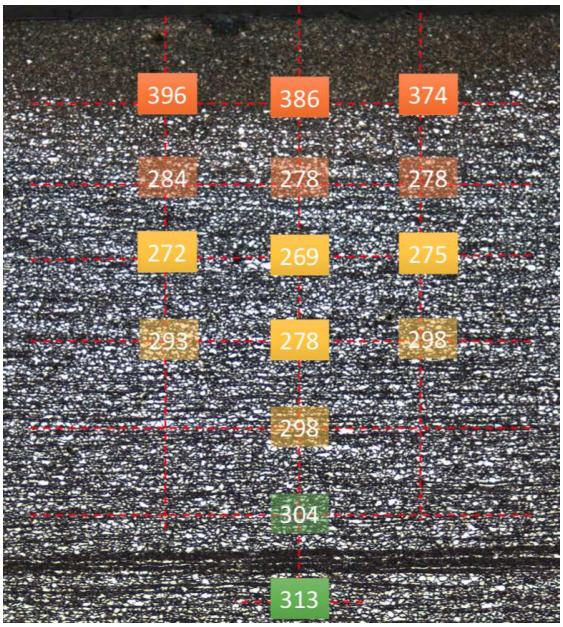


Abbildung 4.20: Härteverlauf über Werkstückdicke

Es ist zu erkennen, dass bei vorliegender Parameterwahl das Blech nahezu über den gesamten Querschnitt wärmebehandelt wurde. Im oberen Bereich der Probe stellt sich eine Aufhärtung des Grundwerkstoffes ein. Dem folgt ein entfestigter Bereich, der sich nahezu bis an die Unterseite des Probenkörpers fortsetzt.
Vergleicht man die Härtemessung der Probe DoE2 mit dem dazugehörigen Temperaturverlauf in Abbildung 4.21, sieht man, dass die verwendete Wärmeleitungsgleichung 5.39, plausible und zu den metallurgischen Eigenschaften passende Werte liefert. Die markierten Verläufe in nachfolgender Abbildung wiesen eine Aufhärtung des Grundmaterials auf.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

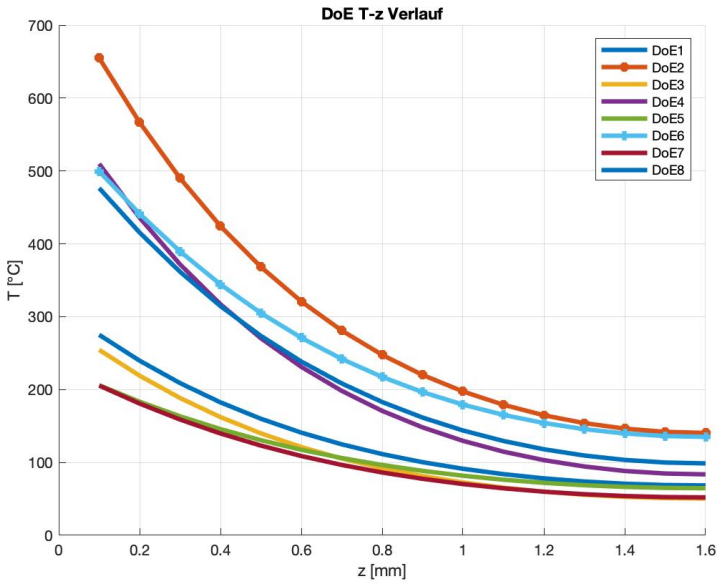


Abbildung 4.21: Temperaturverlauf über Werkstückdicke nach Glg. 5.39

4.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

In nachfolgender Tabelle sind jene Qualitätsmerkmale vermerkt, die für die weitere statistische Versuchauswertung herangezogen werden.

	Leistung **P**	Vorschub **v**	Fokuslage **f**	Härtespurbreite **HB** [mm]	Härte **HV** [HV0.5]	Absorptionsgrad **HA** [%]
y_1	−	−	−	1.8	226	13.5
y_2	+	−	−	2.8	538	22.4
y_3	−	+	−	0.75	266	13.5
y_4	+	+	−	1.55	237	18.8
y_5	−	−	+	0.8	266	11.4
y_6	+	−	+	2.4	531	19.6
y_7	−	+	+	0.6	266	12.5
y_8	+	+	+	1.6	229	20.5

Tabelle 4.5: Ergebnisse DoE1

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

5 Absorptionsgrad

Um die Prozesssicherheit zu gewährleisten und geforderte Härtewerte und Härtetiefen zu erreichen, ist es notwendig die vorherrschenden Temperaturverhältnisse am Werkstück zu kennen. Eben dafür ist Kenntnis über den Absorptionsgrad erforderlich. Betrachten wir den Prüfkörper in Abbildung 5.1, so ist mittig der wärmebeeinflusste Bereich, in folge von Laserbestrahlung, erkennbar.

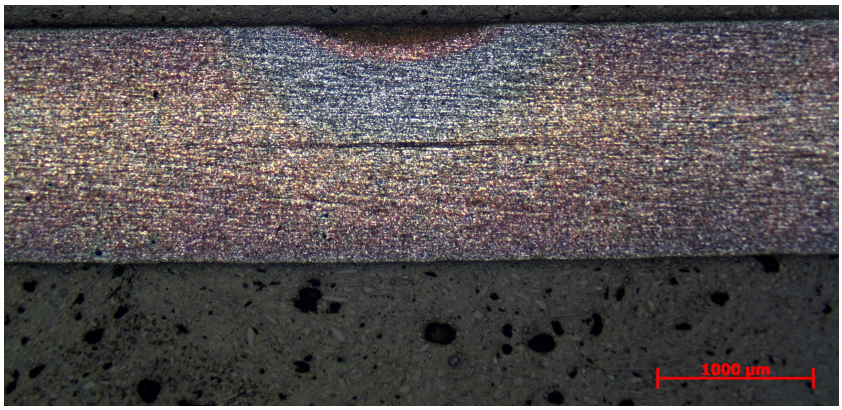


Abbildung 5.1: Schliff DoE2 (2.5x)

Der Absorptionsgrad wird mittels Analyse der Wärmeverteilung im Probenkörper ermittelt. Zu diesem Zweck werden die vorherrschenden Temperaturen an der Probenkörperrückseite mit Thermoelementen während der Laserbestrahlung gemessen. Diese Daten werden anschließend verwendet, um Wärmeleitungsgleichungen zu lösen. Dabei wird die Wärmeleitungsgleichung schrittweise entwickelt, um, beginnend bei einer punktförmigen Wärmequelle bis hin zu einer kreisförmigen Wärmequelle, die Prozessführung der Laserwärmebehandlung ausreichend genau zu beschreiben. Ein metallografischer Schliff wurde erstellt, um einen Initialwert des Absorptionsgrades zu ermitteln und die Plausibilität der weiteren Ergebnisse der Wärmeleitungsgleichung zu gewährleisten.

5.1 Theoretische Grundlagen der Absorption

Die in das Material eingekoppelte Leistungsdichte ist direkt abhängig vom Absorptionsgrad. Ein Ziel der Arbeit ist es, ebendiesen unter realen Einsatzbedingungen zu ermitteln. Betrachtet man den Laserstrahl während der Einwirkung auf die metallische

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Probenoberfläche, wird dessen Ausbreitungsgeschwindigkeit stark reduziert als auch einer Dämpfung ausgesetzt. Der komplexwertige Brechungsindex, siehe Gleichung 5.1, beschreibt diese zeitliche und räumliche Ausbreitung der Welle als auch die damit verbundene Absorption (es treten unterschiedliche Notationen auf, siehe Gleichung 5.1 bis 5.2)

$$n = n_r - ik \tag{5.1}$$

$$n = n_r + in_i \tag{5.2}$$

Betrachtet man die ebene Wellengleichung 5.3 und den zugehörigen Wellenvektor 5.4

$$E(z,t) = E_0 \cdot e^{(i\omega t - ikz)} \tag{5.3}$$

$$k = \frac{n\omega}{c} \tag{5.4}$$

unter Berücksichtigung der oben angeführten Gleichung 5.2, folgt:

$$\begin{aligned} E(z,t) &= E_0 \cdot e^{(i\omega t - ikz)} \\ &= E_0 \cdot e^{(i\omega t - i\frac{\omega n_r}{c}z + i\frac{\omega n_i}{c}z)} \\ &= \underline{E_0 \cdot e^{(\frac{\omega n_i}{c}z)}} \cdot e^{(i\omega t - i\frac{\omega n_r}{c}z)} \end{aligned} \tag{5.5}$$

Dabei weist $E(z,t)$ einen schnell oszillierenden Anteil, Wellenlänge im Material abhängig vom Realteil n_r, auf. Der Amplitude der elektromagnetischen Welle wird durch den Imaginärteil n_i eine Dickenabhängigkeit (z-Achse) zugewiesen, siehe unterstrichener Teil der Gleichung 5.5. Bei einem negativen Imaginärteil nimmt die Feldstärke exponentiell ab, der Imaginärteil verursacht somit eine Absorption des Lichtes [15]. Entsprechend ist die Intensität ortsabhängig:

$$\begin{aligned} I(z) &= I(0) \cdot e^{(\frac{2\omega n_i z}{c})} \\ &= I(0) \cdot e^{(-\alpha \cdot z)} \end{aligned} \tag{5.6}$$

Das negative Vorzeichen in Gleichung 5.1 folgt der Notation Feynmans, siehe Kapitel 'The Origin of the Refractive Index', welcher absorbierenden Medien einen positiven Imaginärteil zuordnet [16]. Wird diese Notation für den komplexen Brechungsindex verwendet so muss die Vorzeichenkonsistenz beachtet werden.

Betrachtet man in Abbildung 5.2 die Intensität an der Absorptionslänge l_α,

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

$$l_\alpha = \frac{1}{\alpha} \tag{5.7}$$

so erkennt man, dass diese auf den Bruchteil von $\frac{1}{e}$ abgeklungen ist. Die Absorptionslänge l_α gibt Auskunft darüber, ob ein Werkstück mit endlichen Maßen für Laserstrahlung transparent ist oder eben jene vollkommen absorbiert. Aufgrund der sehr geringen Reichweite von Licht in Metallen ($l_\alpha << d$, wenige Nanometer) wird davon ausgegangen, dass die gesamte eindringende Lichtintensität absorbiert wird [17].

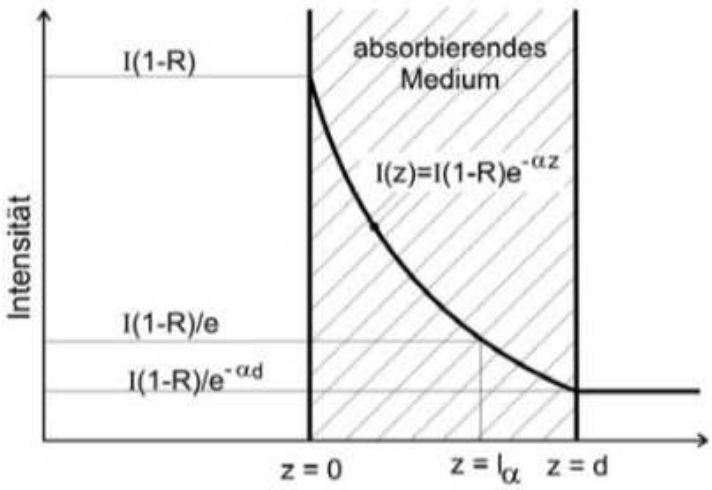


Abbildung 5.2: Intensitätsverlauf im absorbierenden Medium [4]

Somit wird die durch die Laserstrahlung zur Verfügung gestellte Energie von Metallen Reflektiert und Absorbiert, die Transmission stellt sich somit mit $T = 0$ ein. Die Energiedeposition im Werkstück durch Laserbestrahlung kann nun wie folgt angegeben werden[4]:

$$1 = R + A \tag{5.8}$$

5.2 Wärmeleitung

Wärme ist eine Energieform, deren Transport durch Temperaturdifferenzen verursacht wird. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird angenommen, dass bei der zu beschreibenden Problemstellung der Transport lediglich in Folge von Konduktion auftritt. Der Wärmestrom wird mittels Fourierschem Gesetz wie folgt beschrieben:

$$\dot{Q} = -kA\frac{dT}{dx} \tag{5.9}$$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

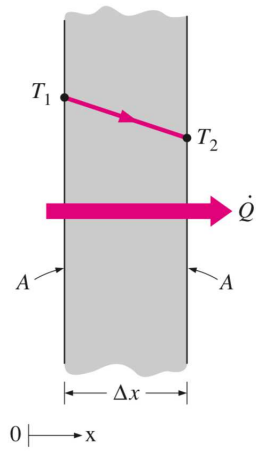


Abbildung 5.3: Wärmeleitung in Folge von Konduktion [18]

In Abbildung 5.3 sieht man den Temperaturgradienten dT/dx als Steigung des Temperaturverlaufs im T-x Diagramm. Aus Gleichung 5.9 geht hervor, dass die Dicke des betrachteten Körpers nicht in die Berechnung eingeht sondern die Fläche, über welche der Wärmetransport stattfindet.
Betrachtet man nun die Wärmeleitung durch eine dünne Platte wie in Abbildung 5.3, so kann man davon ausgehen, dass die dominierende Wärmeleitung lediglich in einer Dimension, der Dickenrichtung, auftritt. Es stellt sich somit eine eindimensionale Wärmeleitung ein.
Die Wärmebehandlung eines Werkstückes ist abhängig von kontrollierter Temperaturführung über einen definierten Zeitraum. Nach dieser Definition liegt ein zeitabhängiges, transientes, Wärmeleitungsproblem vor.

5.2.1 Simple Lösungen der linearen Wärmeleitungsgleichung

In diesem Abschnitt soll ein grundlegendes Verständnis für die Lösung einfacher Wärmeleitungsprobleme dargelegt werden. Des Weiteren muss definiert werden, dass die chemisch-physikalischen Eigenschaften des betrachteten Werkstoffes isotrop, in alle Richtungen hin gleiche Charakteristika aufweisend, sind. Dies ist notwendig, um lineare Differentialgleichungen aufzustellen, für welche nachfolgend geschlossene Lösungen, siehe 5.2.4, dargelegt werden können [19, S.10ff]. Es werden isotherme Oberflächen ($T = f(x, y, z, t)$) parallel zu $z = 0$ analysiert, dabei ist die Wärmeleitung linear und parallel zur z-Achse.
Zu der lineare Wärmeleitungsgleichung

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{1}{\kappa}\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \tag{5.10}$$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

können nun eine Reihe von mathematisch simpel gefassten Lösungen präsentiert werden (um den Umfang der Arbeit nicht zu strapazieren, werden lediglich notwendige Lösungen angeführt, umfangreichere Beschreibungen können den Standardwerken, siehe z.B.: Carslaw & Jaeger , entnommen werden). Diese werden im weiteren Verlauf zur Beschreibung komplexerer Sachverhalte erneut herangezogen.

Quellenlösung

Betrachtet man

$$u = t^{-\left(\frac{1}{2}\right)}\, e^{-\left(\frac{z^2}{4\,\kappa\,t}\right)}$$

da

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{2\,t^{\frac{3}{2}}}\, e^{-\left(\frac{z^2}{4\,\kappa\,t}\right)} \frac{z^2}{4\,\kappa\,t^{\frac{5}{2}}}\, e^{-\left(\frac{z^2}{4\,\kappa\,t}\right)} \tag{5.11}$$

und

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\frac{1}{2\,\kappa\,t^{\frac{3}{2}}}\, e^{-\left(\frac{z^2}{4\,\kappa\,t}\right)} \frac{z^2}{4\,\kappa^2\,t^{\frac{5}{2}}}\, e^{-\left(\frac{z^2}{4\,\kappa\,t}\right)}$$

folgt, dass die Gleichung 5.11 eine Partikulärlösung von Gleichung 5.10 mit folgenden Eigenschaften ist:

$u \to 0$, mit $t \to 0$ für $z \neq 0$
$u \to \infty$, mit $t \to 0$ wenn $z = 0$

$$\int_{-\infty}^{\infty} u\, dz = 2\,(\pi\,\kappa)^{\frac{1}{2}}\,, t\ >\ 0 \tag{5.12}$$

Fehlerfunktionslösung

Es folgt wie bei der Quellenlösung, dass

$$\int_0^z t^{\frac{1}{2}}\, e^{-\left(\frac{z^2}{4\,\kappa\,t}\right)} dz = 2\,\kappa^{\frac{1}{2}} \int_0^{z/2(\kappa\,t)^{\frac{1}{2}}} e^{-\xi^2} d\xi \tag{5.13}$$

der Gleichung 5.10 genügt. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird folgende Notation verwendet:

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

$$\operatorname{erf} z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-\xi^2} d\xi \tag{5.14}$$

Es wurde somit bewiesen, dass

$$C \ \operatorname{erf} z \ \frac{z}{(2\kappa t)^{\frac{1}{2}}} \tag{5.15}$$

mit C als beliebiger Konstante eine Lösung von 5.10 ist. Im weiteren Verlauf der Arbeit finden auch noch folgende Definitionen Anwendung:

$$\operatorname{erfc} z = 1 - \operatorname{erf} z \tag{5.16}$$

$$\operatorname{ierfc} z = \int_z^\infty \operatorname{erfc} \ \xi \ d\xi = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-z^2} - z \ \operatorname{erfc} z \tag{5.17}$$

5.2.2 Laplacesche Lösung für unendliche Körper

Eine Lösung der linearen Wärmeleitungsgleichung im Bereich von $-\infty < z < \infty$ soll mit $T = f(z)$ bei $t = 0$ als Randbedingungen gefunden werden. Es folgt aus obigen Überlegungen nach Gleichung 5.11, dass

$$\frac{1}{(2\pi\kappa t)^{\frac{1}{2}}} \ e^{-\left((z-z')^2/4\kappa t\right)} \tag{5.18}$$

ein partikuläres Integral von 5.10 ist. Eine allgemeine Lösung mit allen Integrationskonstanten wird allgemein als Integral der Differentialgleichung bezeichnet. Eine Zuweisung von definierten Integrationskonstanten führt zu einem partikulären Integral [20, S.270]. Durch die Linearität der Gleichung ist die Summe einer beliebigen Anzahl von partikulären Integralen ebenfalls ein Integral, und somit folgt, dass, wenn folgendes Integral

$$T = \frac{1}{2(\pi\kappa t)^{\frac{1}{2}}} \int_{-\infty}^{\infty} f(z') \ e^{-\left((z-z')^2/4\kappa t\right)} \ dz' \tag{5.19}$$

konvergiert,es der linearen Wärmeleitungsgleichung genügt [19, S.53].

5.2.3 Halbunendliche Körper

Der Körper ist begrenzt durch die Ebene $z = 0$, und in positiver Achsrichtung geht $z \to \infty$, die Anfangstemperatur sei gegeben durch $T_0 = f(z)$, die Temperatur an der Oberfläche ist gegeben durch $T \big|_{z=0} = 0$. Die Lösung dieses Problems wird abgeleitet von der bereits angeführten Lösung für unendliche Körper (siehe Abschnitt 5.2.2). Es

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

wird angenommen, dass sich der Körper auch in die negative z-Richtung ausdehnt. Dabei gilt für $T_0 \mid_{-z'} = -f(z')$ wenn $z' > 0$ sowie $T_0 \mid_{z'} = f(z')$.

Aus Gleichung 5.19 folgt:

$$T = \frac{1}{2(\pi\kappa t)^{\frac{1}{2}}} \left\{ \int_0^\infty f(z')\, e^{-\left((z-z')^2/4\kappa t\right)}\, dz' + \int_{-\infty}^0 -f(-z')\, e^{-\left((z-z')^2/4\kappa t\right)}\, dz' \right\} \tag{5.20}$$

$$= \frac{1}{2(\pi\kappa t)^{\frac{1}{2}}} \int_0^\infty f(z') \left\{ e^{-\left((z-z')^2/4\kappa t\right)} - e^{-\left((z+z')^2/4\kappa t\right)} \right\} dz'$$

Liegt die Initialtemperatur T_0 als Konstante $\tilde{\mathrm{T}}$ vor und werden folgende Substitutionen vorgenommen

$$z' \Big|_{\int_0^\infty} = z + \xi\, \sqrt{\kappa t} \tag{5.21}$$

$$z' \Big|_{\int_{-\infty}^0} = -z + \xi\, \sqrt{\kappa t} \tag{5.22}$$

so folgt:

$$T = \frac{\tilde{T}}{\sqrt{\pi}} \int_{-x/2(\kappa\, t)^{\frac{1}{2}}}^{x/2(\kappa\, t)^{\frac{1}{2}}} e^{-\xi^2}\, d\xi = \frac{2\tilde{T}}{\sqrt{\pi}} \int_0^{x/2(\kappa\, t)^{\frac{1}{2}}} e^{-\xi^2}\, d\xi \tag{5.23}$$

Man kann erkennen, dass Gleichung 5.23 mit Gleichung 5.15 übereinstimmt. Somit lässt sich schlussfolgern, dass für halbunendliche Körper mit $T \mid_{z=0} = 0$ und $T_0 = \tilde{T}$ folgende Lösung gilt [19, S.58ff]

$$T = \tilde{T}\, \mathrm{erf} \left\{ \frac{z}{2\sqrt{\kappa t}} \right\} \tag{5.24}$$

Für die weitere Anwendung muss Gleichung 5.24 modifiziert werden, um eine Temperaturänderung infolge einer konstanten Wärmestromdichte F_0 an $z = 0$ und für $t > 0$ beschreiben zu können.
Der Fluss

$$f = -K \frac{\partial T}{\partial z} \tag{5.25}$$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

genügt wie T folgender Differentialgleichung (für $z > 0$ und $t > 0$):

$$\kappa \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} = \frac{\partial f}{\partial t} \tag{5.26}$$

Die Lösung von Gleichung 5.26 mit konstantem $f = F_0$, $z = 0$ und $t > 0$ folgt aus 5.24

$$f = F_0 \ \mathrm{erfc} \left\{ \frac{z}{2\sqrt{\kappa t}} \right\} \tag{5.27}$$

Aus 5.25 folgt mittels 5.16 bis 5.17[19, S.75ff]

$$T = \frac{F_0}{K} \int_z^\infty \mathrm{erfc} \frac{z}{2\sqrt{\kappa t}} \, dx \tag{5.28}$$

$$T = \frac{2F_0\sqrt{\kappa t}}{K} \ \mathrm{ierfc} \frac{z}{2\sqrt{\kappa t}} \tag{5.29}$$

5.2.4 Instationäre Wärmeleitung infolge der Wärmebehandlung

Während der Wärmebehandlung liegen zeitabhängige, sogenannte instationäre, Temperaturfelder am Werkstück vor, da sich die thermischen Zustände an den Rändern des betrachteten Körpers verändern. In sämtlichen Betrachtungen werden Konvektion und Wärmestrahlung vernachlässigt. Für die Ermittlung des Absorptiongrades ist es ausreichend, das zeitlich veränderliche Temperaturfeld in einer Koordinate, der Härtetiefe $z = [mm]$, zu beschreiben. Für dieses eindimensionale instationäre Wärmeleitungsproblem liegen geschlossene Lösungen für die jeweiligen Randbedingungen vor, die erläutert wurden.

Wie bereits in der Einleitung des Kapitels 5 erwähnt, kann, mittels metallografischer Untersuchung, eine ausreichend genaue Aussage über die Temperaturverhältnisse im Probenkörper getroffen werden, da sowohl die räumliche Ausdehnung des umwandlungsgehärteten Gebiets als auch die dafür notwendige Temperatur bekannt sind.

Die räumliche Beschreibung des Temperaturfeldes infolge einer konstanten Wärmestromdichte, welche in Gleichung 5.29 beschrieben wird, wird dahingehend angepasst, um die vorliegende Wärmebehandlung mittels Laserbestrahlung abzubilden. Die konstante Wärmestromdichte $F_0 = AI$ wird als Produkt von Absorptionsgrad und nomineller Leistungsdichte dargestellt. Für K wird eine materialabhängige Konstante (K= Wärmeleitfähigkeit, es wird auf die übliche Notation λ verzichtet, da diese bereits als Wellenlänge des Laserstrahls in Verwendung ist) definiert, somit folgt:

$$T_{z,t} = \frac{AI}{K}\sqrt{4\kappa t} \ \mathrm{ierfc} \sqrt{\frac{z^2}{4\kappa t}} \tag{5.30}$$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

Die Oberflächentemperatur leitet sich aus Gleichung 5.30 ab, wenn $z = 0$ gesetzt wird, es folgt:

$$T_{Surf} = \frac{AI}{K}\sqrt{4\kappa t}\,\frac{1}{\sqrt{\pi}} \tag{5.31}$$

Da nun sowohl $T\,|_{z=0mm}$ als auch $z\,|_{T=Ac3}$ beschrieben oder ausgewertet wurden, kann über die Austenitisierungstemperatur die Oberflächentemperatur ermittelt werden:

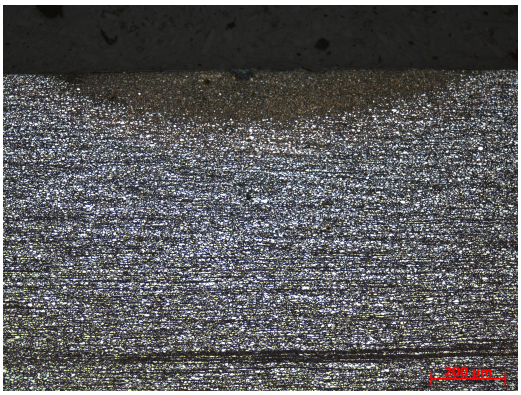
$$\begin{aligned}
\frac{T_{Ac3}}{T_{Surf}} &= \sqrt{\pi}\ \text{ierfc}\sqrt{\frac{z^2}{4\kappa t}} \\
T_{Surf} &= \frac{T_{Ac3}}{\sqrt{\pi}\ \text{ierfc}\sqrt{\frac{z^2}{4\kappa t}}} \\
&= \frac{879°\text{C}}{\sqrt{\pi}\ \text{ierfc}\sqrt{\frac{(0.14mm)^2}{4\cdot 12\frac{mm^2}{s}\cdot 0.09sec}}} \\
&= \underline{991.85°\text{C}}
\end{aligned} \tag{5.32}$$

Nachdem die vorherrschende Temperatur an der Oberfläche infolge der Bestrahlung ermittelt wurde, kann man aus Gleichung 5.31 auf den Absorptionsgrad A schließen:

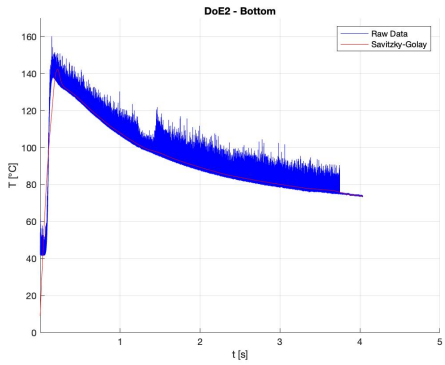
$$\begin{aligned}
A &= \frac{T_{Surf}\ K}{I\cdot\sqrt{\frac{4\kappa t}{\pi}}} \\
&= \frac{991.85°\text{C}\cdot 40\frac{W}{mK}}{1.91\cdot 10^8\frac{W}{m^2}\sqrt{\frac{4\cdot 12\frac{mm^2}{s}\cdot 0.09sec}{\pi}}} \\
&= \underline{17,7\%}
\end{aligned} \tag{5.33}$$

Somit wurde mittels geschlossener Lösungen der eindimensionalen linearen Wärmeleitungsgleichung der Absorptionsgrad unter realen Arbeitsbedingungen ermittelt. Es ist erkennbar, dass dieser von den theoretischen Werten, nach Drude, abweicht. Der errechnete Absorptionsgrad wird nun in die weitere Betrachtung der Wärmeleitungsgleichung aufgenommen. Dieser Wert unterscheidet sich von den folgenden Berechnungsergebnissen in seiner Genauigkeit, da in dieser Initialbetrachtung die räumliche Ausdehnung der Wärmequelle nicht in die Berechnung einfließt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN



(a) Schliff (10x)



(b) Temperaturverlauf Unterseite

Abbildung 5.4: DoE2 Schliff und Temperaturverlauf

5.2.5 Die kreisförmige Wärmequelle

Nachdem über die Gefügeanalyse des Prüfkörpers ein Absorptionsgrad ermittelt wurde, soll das Laserstrahlprofil in der Wärmeleitungsgleichung berücksichtigt werden. Ziel ist es, die an der Unterseite der Proben gemessene Temperatur mittels Variation des Absorptionsgrades analytisch beschreiben. Somit nimmt A in jeder Probenführung, aufgrund der Paramatervariation, einen unterschiedlichen Wert an. Diese werden anschließend als Zielgröße in der statistischen Versuchsplanung einfließen, und somit wird der Einfluss von Leistung, Vorschub und Fokuslage auf den Absorptionsgrad beschrieben.
Die sich einstellenden Temperaturverhältnisse in einem unendlichen/halbunendlichen Körper, mittels Wärmezufuhr über eine kreisförmige Fläche $0 \leq r < a$, werden nach Carslaw & Jaeger [19, S.214ff] folgend definiert:

$$T = \frac{Qa}{2K} \int_0^\infty e^{-\lambda|z|} J_0(\lambda r) J_1(\lambda a) \frac{d\lambda}{\lambda} \tag{5.34}$$

Integriert man nun die infinitesimale Punktquelle über die Zeit, erhält man Kenntnis über die kontinuierliche Punktquelle [19, S.255ff] , welche die vorliegenden Laserstrahlprofile am besten beschreibt. Es wird angenommen, dass Wärme über q pro Zeiteinheit pro Flächeneinheit für $t > 0$ über den Kreis $x^2 + y^2 < a$ an $z = 0$ zugeführt wird. Somit folgt, nach Carslaw & Jaeger, aus Gleichung 5.34, dass die Temperatur an dem Punkt $(0, 0, z)$ folgende ist:

$$\frac{2q\sqrt{\kappa t}}{K} \left\{ \text{ierfc} \frac{z}{2\sqrt{\kappa t}} - \text{ierfc} \frac{(z^2 + a^2)^{\frac{1}{2}}}{2\sqrt{\kappa t}} \right\} \tag{5.35}$$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

Zu diesem Ergebnis kann auch gelangt werden, in dem die lineare Wärmeleitungsgleichung

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{1}{\kappa}\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \tag{5.36}$$

mittels Laplace Transformation gelöst wird, siehe [19, S.301ff].

5.2.6 Lösung für finite Körper und kleine Zeitwerte

Oben angeführte Lösungen der linearen Wärmeleitungsgleichung sind ausschließlich für halb- / unendliche Körper zulässig. Da dies jedoch für die meisten realen Anwendungen nicht angenommen werden kann, ist es notwendig eine Lösung für den finiten Bereich $0 < z < h$ zu finden. In einem dünnen Blech mit der Stärke h kann Wärme nicht an der Unterseite mittels Konduktion abgeführt werden, da der Körper zu dünn ist. Stattdessen wird die zugeführte Wärme zwischen Ober- und Unterseite kumuliert. Es wird angenommen, dass die Wärme, die sich in einem halbunendlichen Körper der Dicke h ($(n+1)$ mal Blechstärke z des zugrundeliegenden Probenkörpers) ausbreitet, sich in ebendiesem ansammelt [21]. Carslaw & Jaeger [19, S.310] liefern hierfür folgenden Ansatz:

$$T = \frac{2Q\sqrt{\kappa t}}{K}\sum_{n=0}^{\infty}\left\{\text{ierfc}\,\frac{(2n+1)h - z}{2\sqrt{\kappa t}} - \text{ierfc}\,\frac{(2n+1)h + z}{2\sqrt{\kappa t}}\right\} \tag{5.37}$$

Folgende, in der Wärmeleitung übliche Notation, wird nachfolgend verwendet:

$$\delta = 2\sqrt{\kappa t} \tag{5.38}$$

Berücksichtigt man die Gleichung 5.35 und führt diese in Gleichung 5.37 über, so beschreibt das eine kreisförmige Wärmequelle in einem finiten Körper. Die Laserwärmebehandlung ist somit ausreichend beschrieben. Es kann mittels Temperaturmessung an der Unterseite des Probenkörpers eine qualifizierte Aussage über dessen Absorptionsgrad getroffen werden. Für kleine Zeitwerte, während der Erwärmung, $t \leq t_i$ gilt:

$$\begin{aligned} T = T_0 + \frac{AI\delta}{K}\sum_{i=1}^{n}\Bigg(&\text{ierfc}\left(\frac{2(i-1)h+z}{\delta}\right) - \text{ierfc}\left(\frac{((2(i-1)h+z)^2 + (\frac{d^2}{4}))^{\frac{1}{2}}}{\delta}\right) \\ &+ \text{ierfc}\left(\frac{2ih+z}{\delta}\right) - \text{ierfc}\left(\frac{((2ih-z)^2 + (\frac{d^2}{4}))^{\frac{1}{2}}}{\delta}\right)\Bigg) \end{aligned} \tag{5.39}$$

Die Gleichung 5.39 kann numerisch gelöst werden, dieser Vorgang wurde in MATLAB R2017b folgerndermaßen realisiert:

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

```
T0      = 20;                   %[ C     - Umgebungstemperatur]
I       = 1.91*10^8;            %[W/m^2  - Intensitaet]
A       = 0.224;                %[%      - Absorptionsgrad]
H       = A*I;                  %[W/m^2  - eingekoppelte
   Leistungsdichte]
K       = 40;                   %[W/mK   - Waermeleitfhgkt]
kappa   = 12*10^-6;             %[m^2/s  - Templeitfhgkt]
h       = 1.6*10^-3;            %[m      - Blechdicke]
d       = 0.8944*2*10^-3;       %[m      - Laserdurchmesser]
t       = 0.09;                 %[s      - Interaktionszeit]
z       = 1.6*10^-3;            %[m      - z-Koordinate]

delta = (2.*sqrt(kappa.*t));
n = 5000;
k = 1:n;
a = sum(((H*delta/K)).*ierfc((2*(k-1)*h+z)/delta));
b = sum(((H*delta/K)).*ierfc(((2*(k-1)*h+z).^2+(d^2/4))
   .^(1/2)/delta));
c = sum(((H*delta/K)).*ierfc((2*k*h-z)/delta));
f = sum(((H*delta/K)).*ierfc((((2*k*h-z).^2+(d^2/4)).^(1/2))
   /delta));
T = T0 + (a-b+c-f)
```

Listing 5.1: numerische Auswertung der WLG in MATLAB

```
function y = ierfc (x)
%y = IERFC(y) ist das Integral der Fehlerfkt fuer
%jedes Element von x, x muss eine reale Zahl sein
y = exp(-x.*x)/sqrt(pi)-x.*erfc(x);
end
```

Listing 5.2: Definition ierfc - Funktion MATLAB

Die numerische Definition der Fehlerfunktion und sämtliche Ableitungen davon können mathematischen Standardwerken entnommen werden, siehe [22, Abs.:7.1]

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Versuchsdurchgang	Parameter	**Temperatur** gem. Unterseite	**Interaktionszeit** $t_i = \frac{d}{v}$	**Absorptionsgrad** errechnet
DoE1	$P = 320W$ $f = 30mm$ $v = 20\frac{mm}{s}$	68°C	$0.09sec$	13.5%
DoE2	$P = 480W$ $f = 30mm$ $v = 20\frac{mm}{s}$	140°C	$0.09sec$	22.4%
DoE3	$P = 320W$ $f = 30mm$ $v = 30\frac{mm}{s}$	50.5°C	$0.06sec$	13.5%
DoE4	$P = 480W$ $f = 30mm$ $v = 30\frac{mm}{s}$	83°C	$0.06sec$	18.8%
DoE5	$P = 320W$ $f = 35mm$ $v = 20\frac{mm}{s}$	64°C	$0.105sec$	11.4%
DoE6	$P = 480W$ $f = 35mm$ $v = 20\frac{mm}{s}$	135°C	$0.105sec$	19.6%
DoE7	$P = 320W$ $f = 35mm$ $v = 30\frac{mm}{s}$	52°C	$0.07sec$	12.5%
DoE8	$P = 480W$ $f = 35mm$ $v = 30\frac{mm}{s}$	98°C	$0.07sec$	20.5%

Tabelle 5.1: Absorptionsgrad in Abhängigkeit der Eingangsparameter

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

6 statistische Versuchsplanung - DoE

Da konventionelle Versuchsführungsmethoden wie “One - Value - at - a - Time„ oder „Trial - and - Error“ mit hohem finanziellen und zeitlichen Aufwand verbunden sind, wurde in dieser Arbeit das Augenmerk auf die statistische Versuchsführung gelegt.
Der größte Vorteil der statistischen Versuchsführung (nachfolgend wird des Öfteren die englische Bezeichnung „Design of Experiments“, oft als „DoE“, abgekürzt verwendet), im Vergleich zu oben genannten Abläufen liegt neben der reduzierten Anzahl an Versuchen in der Möglichkeit, die Wechselwirkungen zwischen einzelnen Parametern genauer analysieren zu können. [23]

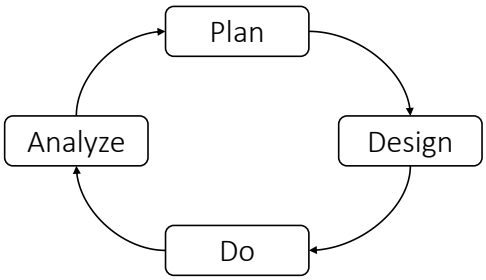


Abbildung 6.1: Prozess Versuchsführung

In Anlehnung an Abbildung 6.1 wird die Versuchsführung als Zyklus betrachtet. Dies bietet den Vorteil, eine permanente Verbesserung der Güte des Versuchsmodells als Ziel zu haben. Nachfolgend werden dieser Zyklus und dessen Teilschritte ausführlich beschrieben[24]

6.1 Versuchsplanung

Bevor mit der Versuchsplanung begonnen wurde, wurde eine klare Problemstellung definiert. Diese muss ein oder mehrere, quantifizierbare, somit messbare Charakteristika aufweisen, welche im Weiteren statistisch analysiert werden können, diese werden als Qualitätsmerkmale bezeichnet.

6.1.1 Qualitätsmerkmale

Der Erfolg der statistischen Versuchsführung ist abhängig von der Wahl der passenden Qualitätsmerkmale. Diese müssen die anfänglich definierte Problemstellung beeinflussen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

und eindeutig zwischen guten und schlechten Systemeinstellungen unterscheiden können. Sind die Qualitätsmerkmale passend ausgewählt, werden im Verlauf der Arbeit lediglich diese analysiert. Die Möglichkeit, die Qualitätsmerkmale unabhängig erfassen und statistisch auswerten zu können, erleichtert die Optimierung des Modells [25, S.37ff].
Die, für diese Arbeit, definierten Qualitätsmerkmale sind:

- Härtespurbreite HB = [mm]
  Die Härtespurbreite gibt Auskunft über die erreichte Ausdehnung der Wärmeeinflusszone
- Härte HV = [HV]
  Der Härtewert gibt Auskunft über die erreichte Aufhärtung / Entfestigung des Grundmaterials
- Absorptionsgrad HA = [%]
  Der Absorptionsgrad gibt Auskunft über den Anteil der in das Material eingekoppelten Energie

6.1.2 Parameter

Veränderbare sowie unveränderbare Eingangsgrößen werden in der statistischen Versuchsführung als Parameter bezeichnet. Die Auswahl der Parameter, welche in den Versuchsplan aufzunehmen sind, muss anhand deren Einfluss auf die Zielgrößen vorgenommen werden. Dabei ist es von größter Wichtigkeit, jene auszuwählen, welche den größtmöglichen Effekt auf die definierten Qualitätsmerkmale haben. In dieser Arbeit wurden folgende Parameter als Faktoren in den Versuchsplan aufgenommen [23, S.5ff]:

- Leistung P = [kW]
- Vorschub v = [mm/s]
- Fokuslage f = [mm]

6.1.3 Stufen

Den oben genannten Faktoren müssen definierte Zustände mit gleichbleibenden Abständen zugeordnet werden, diese werden als Stufen bezeichnet. Stufen werden in dieser Arbeit in kodierten Abständen -1 sowie $+1$ definiert, wobei -1 dem jeweiligen Faktor sein Minimum und $+1$ analog dazu sein Maximum zuordnet.
Die Manipulation der Parameter zwischen den Stufen Minimum (-1) und Maximum (+1) verursacht einen sogenannten Effekt am Qualitätsmerkmal. Diese Effekte werden

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

anschließend zur Modellbildung herangezogen. Den Stufen werden im Abschnitt 6.3 die jeweiligen Zahlenwerte zugeordnet.

Versuchsplanung		
Parameter	P	Leistung
	v	Vorschubgeschwindigkeit
	f	Fokuslage
Qualitätsmerkmale	HB	Härtespurbreite
	HV	Härtewert
	HA	Absorptionsgrad
Stufen	2	±1

Tabelle 6.1: Versuchsplannung Zusammenfassung

6.2 Versuchsdesign

Die Versuchsführung wurde mittels 2-stufigem (x), 3-faktoriellem (n) Versuchsplan (x^n) beschrieben. Abbildung 6.2 beschreibt das Versuchsmodell und die dazugehörigen Parameter, dabei ist zu beachten, dass Aufhärtung des Grundmaterials als auch Erhöhung der Verformbarkeit des Grundmaterials mit identischen Parametern beziehungsweise Qualitätsmerkmalen ausgewertet werden können. Dies spiegelt die Flexibilität der angewandten Herangehensweise wider. In diesem Fall werden dem System keine Störgrößen zugeführt, da sämtliche Versuche unter Laborbedingungen durchgeführt wurden (es herrschten konstante Temperaturen während der gesamten Versuchsführung, des Weiteren wurden die Proben mittels Keramikplatten an den Rändern eingespannt, um thermische oder elektrische Störeinflüsse zu mindern).

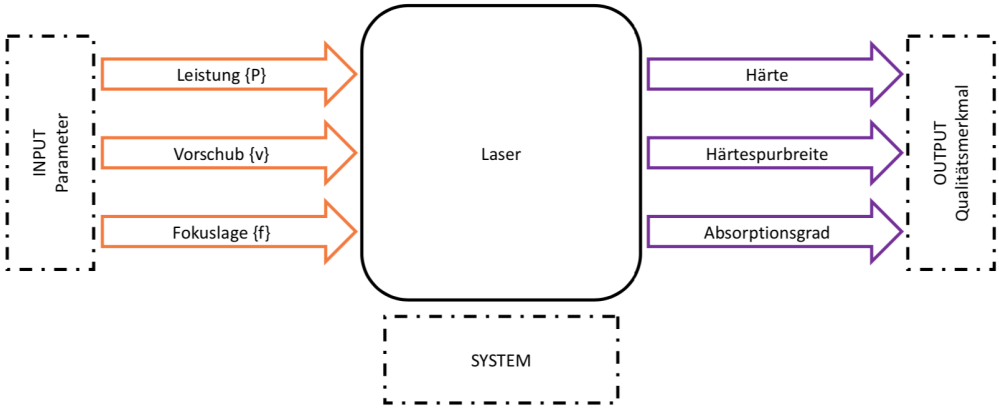


Abbildung 6.2: Systembeschreibung

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

6.3 Versuchsdurchführung

Anhand des generierten Versuchsplans ist nun die Variation der Eingangsparameter ersichtlich. Bevor mit der eigentlichen Arbeit begonnen werden kann, muss den jeweiligen Stufen ((−1) und (+1)) ein reeler Wert zugewiesen werden. Diese Zuweisung erfolgt in einem Prozessfenster, welches von den Anforderungen an das Werkstück abhängt.
Die Proben wurden vor der Bestrahlung von Schmutz- & Fettrückständen befreit. Die Proben sollten des Weiteren an den Seitenrändern keine thermische Interaktion mit der Einspannungsvorrichtung aufweisen. Es wurden zwischen Blech und Einspannungsvorrichtung Keramikplatten platziert, diese dienen sowohl der thermischen als auch der elektrischen Isolation. Da sich Thermospannungen im Milivolt bewegen, sollen sämtliche Interferenzen vermieden werden. Die Oberseite und Unterseite der Probe stehen nicht in Kontakt mit artfremden Materialien.

6.3.1 Prozessfenster

Die Notwendigkeit der Wahl eines Prozessfensters lässt sich damit erklären, dass sich diese Arbeit auf das Verhalten des Dualphasenstahles während einer Wärmebehandlung beschränkt, ergo ist ein Aufschmelzen der Werkstückfläche unzulässig. Es gilt, die Parameter dahingehend auszulegen, dass ein Trade - Off zwischen Oberflächenintegrität und merklichen Veränderungen in den Materialeigenschaften erreicht wird. Die Maxima und Minima wurden mittels *"Trial and Error"* eruiert. Eine solche Initialversuchsführung ist nachfolgend abgebildet.

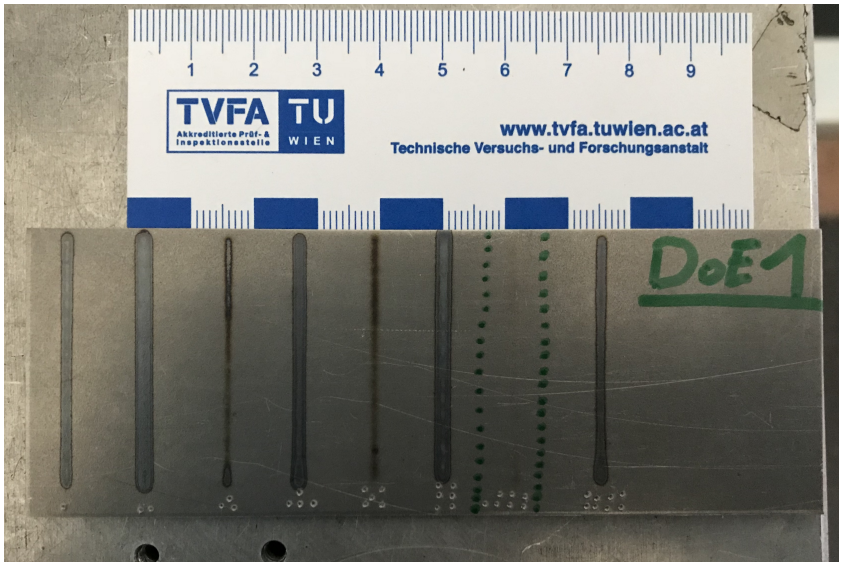


Abbildung 6.3: Versuchsdurchgang 1

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Leistung - P

Faserlaser zeichnen sich neben ihrem sehr guten Wirkungsgrad auch durch eine sehr hohe Strahlqualität aus. Da die Beugungsmaßzahl M^2 im Bereich von $1 - 1.2$ liegt, lässt sich der Strahl sehr gut fokussieren, was zu einem geringen Fokusdurchmesser führt. Es wird eine stark konzentrierte Wärmequelle erzeugt und somit die Gefahr des Aufschmelzens erhöht, dies ist unter allen Umständen zu verhindern [26, 3].

Vorschub - v

Die Bearbeitungszeit, in welcher der Laser mit dem Blech interagiert, ist aus wirtschaftlicher Sicht immer niedrig zu halten, um Kosten zu minimieren. Aus technologischer Sicht kann eine zu hohe Vorschubgeschwindigkeit in Kombination mit niedrigen Leistungen zu kaum realisier- oder analysierbaren Werkstoffmodifikationen führen. Andererseits führt eine niedriges v, gepaart mit hohen Leistungen, zum Aufschmelzen des Bleches. Hier manifestiert sich die Wichtigkeit eines passenden Prozessfensters.

Fokuslage - f

Im Bereich des Oberflächenhärtens von metallischen Werkstoffen mittels Laserbestrahlung ist es sinnvoll, den Fokus aus der Werkstückoberfläche hinauszurücken. Betrachtet man Abbildung 6.4, würde beim Fügen der minimale Strahldurchmesser innerhalb der Fügeteile liegen. Bei der Oberflächenmodifikation würde die Werkstückoberfläche am rechten äußersten Rand der Abbildung 6.4 liegen. Der große Vorteil der Manipulation der Fokuslage ist die leicht anpassbare Größe des "Fokusfleck" (Durchmesser des Strahles).

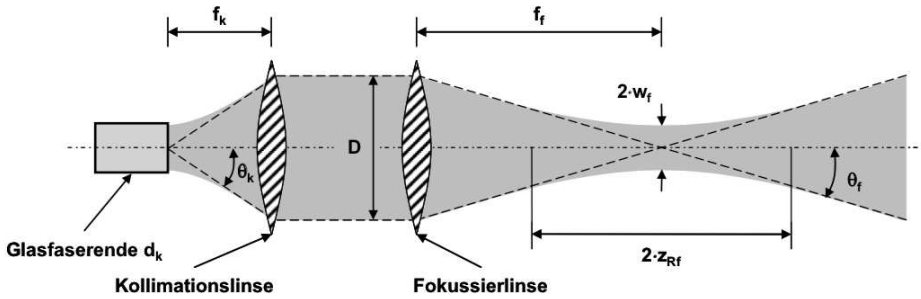


Abbildung 6.4: Fokussierung eines Gauß - Strahls [26]

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Zusammenfassung

Nachfolgend sind den Stufen der Parameter ihre numerischen Werte zugeordnet.

Parameter	−	+	Beschreibung
Leistung [P]	320W	480W	Aufschmelzen der Oberfläche unzulässig
Vorschub [v]	20 $\frac{mm}{s}$	30 $\frac{mm}{s}$	Aus wirtschaftlichen Gründen gilt es, Arbeitszeit zu optimieren
Fokuslage [f]	30mm	35mm	Bei Wärmebehandlung defokussieren aus Werkstückebene heraus

Tabelle 6.2: Zusammenfassung Prozessfenster

6.4 Statistische Versuchsauswertung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse, die während der Versuchsführung in Kapitel 4 ermittelt wurden, in den Prozess der statistischen Versuchsführung übergeführt. Des Weiteren soll der dabei zur Verwendung kommende MATLAB-Code angeführt werden, um die Verständlichkeit der einzelnen Schritte zu gewährleisten.

6.4.1 Versuchsplanung MATLAB

Die Planung der Versuchsführung wurde mittels *MATLAB R2017b* realisiert. Nachfolgend sollen die einzelnen Schritte in den jeweiligen Kapiteln bis zur Komplettierung des Versuchsaufbaus schlüssig dargestellt werden. Die Intention liegt in der möglichen Adaption dieses Codes für weitere artverwandte oder gänzlich unterschiedliche Experimente. Wie bereits im Abschnitt 6.2 erwähnt, wurde ein 3-Faktoren Versuchsplan in zwei Abstufungen verwendet. Daraus resultiert, dass für eine vollständige Beschreibung unseres Sachverhaltes $2^3 = 8$ (Eckpunkte) Versuche durchgeführt werden müssen. Die Anordnung der Versuche, unter Berücksichtigung der veränderbaren Parameter, stellt einen Würfel dar, bei dem jeder Eckpunkt einen Versuchsdurchgang beschreibt (1-8), siehe Abbildung 6.5.

```
VP1          = fracfact('P v f');
col_VP1      = {'P' 'v' 'f'};
row_VP1      = {'1' '2' '3' '4' '5' '6' '7' '8'};
```

Listing 6.1: Erstellung des vollfaktoriellen VP in MATLAB

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

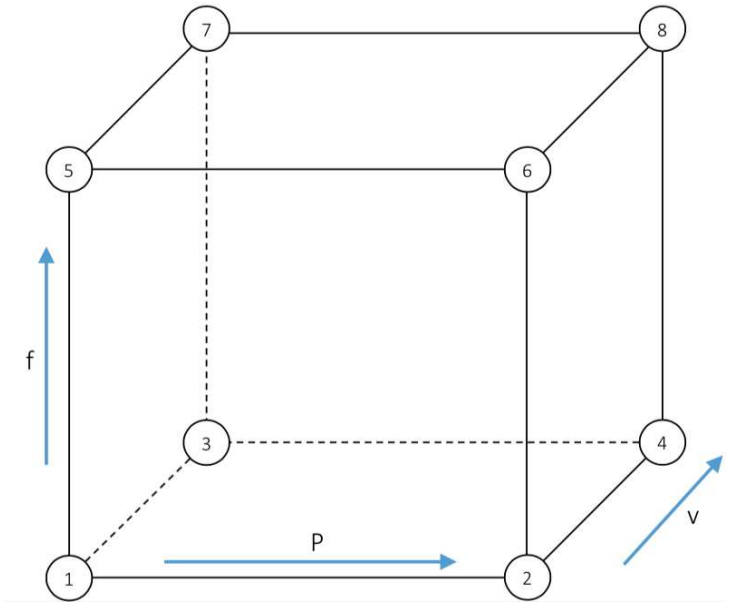


Abbildung 6.5: Versuchsplan - vollfaktoriell

Der beschriebene Versuchsplan wurde mit dem Quellcode 6.1 erstellt. Die Parameterbeschreibung und Kodierung der Einstellungen ist in Tabelle 6.1 angeführt. Der somit generierte Versuchsplan gibt die notwendigen Einstellungen des Parameters in Abhängigkeit zum jeweiligen Qualitätsmerkmal wider.

	Leistung P	**Vorschub** v	**Fokuslage** f
y_1	-1	-1	-1
y_2	1	-1	-1
y_3	-1	1	-1
y_4	1	1	-1
y_5	-1	-1	1
y_6	1	-1	1
y_7	-1	1	1
y_8	1	1	1

Tabelle 6.3: Versuchsplan

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

6.4.2 Haupteffekte

Die ausgewerteten Qualitätsmerkmale geben Auskunft über die Wirkung eines Faktors auf das System. Bildet man die Differenz zweier Mittelwerte (MW bei + und MW bei −), auch als Kontrastmethode bekannt, so erhält man die Effekte. Mit diesem Vorgehen wird auch die Versuchsstreuung minimiert [23, S.12]. Es werden nachfolgend die Effekte für die jeweiligen Faktoren gebildet:

$$E_P = \frac{y_2 + y_4 + y_6 + y_8}{4} - \frac{y_1 + y_3 + y_5 + y_7}{4} \tag{6.1}$$

$$E_v = \frac{y_3 + y_4 + y_7 + y_8}{4} - \frac{y_1 + y_2 + y_5 + y_6}{4} \tag{6.2}$$

$$E_f = \frac{y_5 + y_6 + y_7 + y_8}{4} - \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4}{4} \tag{6.3}$$

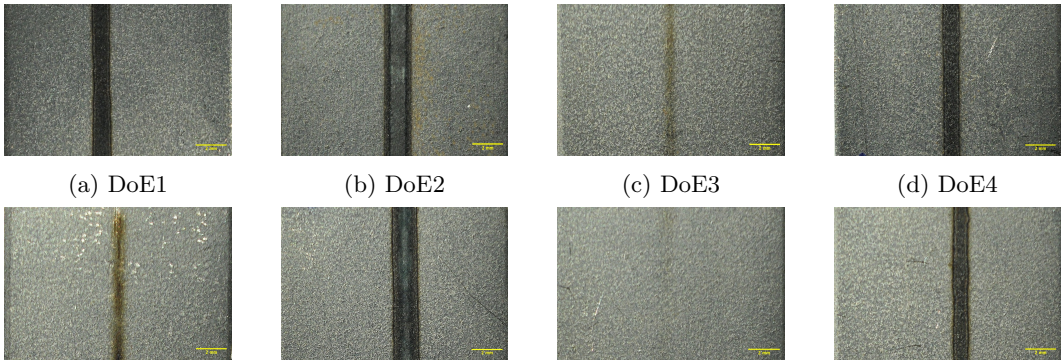
Die in Tabelle 6.6 , 6.11 & 6.15 zusammengefassten Effekte werden anschließend in einem Haupteffektdiagramm visualisiert. Es ist eine standardisierte Darstellung mit einer dimensionslosen Stufenkodierung der Faktoren auf der Abszisse und den Ausprägungen der Qualitätsmerkmale auf der Ordinate. Somit können Merkmale unterschiedlicher physikalischer Einheiten verglichen werden.

Im Haupteffektdiagram sind somit zwei Linien zu erkennen, der Stufenmittelwert und die Effektlinie. Der Stufenmittelwert ist im Haupteffektdiagramm des jeweiligen Qualitätsmerkmals für alle Faktoren ident und muss von jeder Effektlinie in der Mitte geschnitten werden. Dies dient auch der Überprüfung, ob die vorliegenden Daten richtig ausgewertet wurden, die Fehler werden somit früh erkannt und können ausgebessert werden. Die Effektlinie bildet hierbei die Veränderung des Qualitätsmerkmals in Folge der Faktorenvariation von Minimum − auf Maximum + ab. Die Steigung der Effektlinie repräsentiert den Effekt und je größer dessen Steigung (in positiver und negativer Ausprägung) desto größer der Einfluss der Faktorvariation auf das betrachtete Qualitätsmerkmal.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

Härtespurbreite HB

Als Härtespurbreite wird die auswertbare Breite der Wärmeeinflusszone infolge der Laserwärmebehandlung definiert. Die Breite aus den Härteverlaufsdiagrammen stimmt dabei mit den optisch erfassten Werten, mittels Bildauswertungssoftware ImageJ ausgewertet, überein.



(a) DoE1 (b) DoE2 (c) DoE3 (d) DoE4

(e) DoE5 (f) DoE6 (g) DoE7 (h) DoE8

Abbildung 6.6: Härtespurbreiten im Vergleich

Abbildung 6.6 zeigt die Auswirkungen der Parametervariation auf den Haupteffekt HB, die Auswertung mittels Kontrastmethode ist in Tabelle 6.6 zusammengefasst. Aus den

	Leistung **P**	Vorschub **v**	Fokuslage **f**	Härtespurbreite **HB** [mm]
	−	−	−	1.8
	+	−	−	2.8
	−	+	−	0.75
	+	+	−	1.55
	−	−	+	0.8
	+	−	+	2.4
	−	+	+	0.6
	+	+	+	1.6
MW +	2.0875	1.125	1.35	
MW −	0.9875	1.95	1.725	
Effekt	1.1	-0.825	-0.375	

Tabelle 6.4: Effektberechnung HB

berechneten Mittelwerten wird anschließend das Haupteffektdiagramm, Abbildung 6.7 erstellt. Hierbei ist zu sehen, dass alle Faktoren einen ausgeprägten Einfluss auf die

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

Breite der Wärmeeinflusszone haben, da die Steigung aller Effektlinien stark ausgebildet ist. Während eine Leistungserhöhung mit einer breiteren Spur einhergeht, verkleinert sich die Härtespurbreite, wenn die Vorschubgeschwindigkeit erhöht wird. Eine sehr interessante Ausprägung weist die Effektlinie der Fokuslage f auf. Bei einer Defokussierung der Laserstrahldurchmesser wird dieser aufgeweitet, und somit vergrößert sich die Breite der Wärmeeinflusszone. In dieser Beobachtung liegt jedoch eine negative Steigung im Haupteffektdiagramm vor. Eine mögliche Erklärung ist die Reduktion der Leistungsdichte infolge der Defokussierung bei gleichbleibender Leistung. Es scheint die Grenzen der Defokussierbarkeit in diesem Leistungsbereich erreicht worden zu sein.

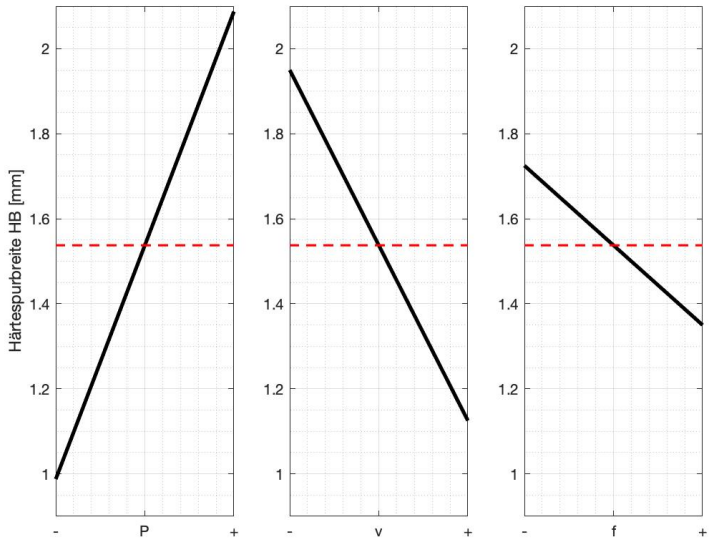


Abbildung 6.7: Haupteffektdiagramm Härtespurbreite

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

```
%%%%%%%%% Effektdiagramm Haertespurbreite HB %%%%%%%%%%%%%%%
WW_HB_fig = figure('NumberTitle', 'off', 'Name', '
    Haertespurbreite HB [mm]');
subplot(1,3,1);
HE_P_HB = plot([0 1],[MW_P_neg_HB MW_P_pos_HB] , '-k','
    MarkerEdgeColor','k', 'Linewidth',1.5);
hold on
plot([0 1],[((MW_P_pos_HB+MW_P_neg_HB)/2) ((MW_P_pos_HB+
    MW_P_neg_HB)/2)])
hold off
xticks([0 0.5 1])
xticklabels({'-','P','+'})
ylim([0.9 2.1])
ylabel('Haertespurbreite HB [mm]')
subplot(1,3,2);
HE_v_HB = plot([0 1],[MW_v_neg_HB MW_v_pos_HB],'-k','
    MarkerEdgeColor','k', 'Linewidth',1.5);
hold on
plot([0 1],[((MW_v_pos_HB+MW_v_neg_HB)/2) ((MW_v_pos_HB+
    MW_v_neg_HB)/2)])
hold off
xticks([0 0.5 1])
xticklabels({'-','v','+'})
ylim([0.9 2.1])
subplot(1,3,3);
HE_f_HB = plot([0 1],[MW_f_neg_HB MW_f_pos_HB],'-k','
    MarkerEdgeColor','k', 'Linewidth',1.5);
hold on
plot([0 1],[((MW_f_pos_HB+MW_f_neg_HB)/2) ((MW_f_pos_HB+
    MW_f_neg_HB)/2)])
hold off
xticks([0 0.5 1])
xticklabels({'-','f','+'})
ylim([0.9 2.1])
saveas(WW_HB_fig,'HB.jpg')
```

Listing 6.2: Erstellung des Haupteffektdiagramms HB in MATLAB

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Härte HV

Bei Randschichthärteverfahren wird allgmein die Oberflächenhärte analysiert. Diese wurde mit der Härteprüfmaschine der Firma MTL bei einer Prüfkraft von HV0.5 durchgeführt. Um die Ausbildung der Wärmeeinflusszone darstellen zu können, wurde die Härtemessung normal zur Vorschubrichtung vorgenommen. Die Messpunkte wurden im Abstand von 0.2mm gesetzt, siehe Kapitel 4.4.

	Leistung **P**	Vorschub **v**	Fokuslage **f**	Härte **HV** [HV0.3]
	−	−	−	226
	+	−	−	538
	−	+	−	266
	+	+	−	237
	−	−	+	266
	+	−	+	531
	−	+	+	266
	+	+	+	229
MW +	383.75	249.5	323	
MW −	256	390.25	316.75	
Effekt	127.75	-140.75	6.25	

Tabelle 6.5: Effektberechnung HV

Aus Tabelle 6.5 geht hervor, dass die vorgenommene Parametervariation zwei Wärmebehandlungsprozesse beziehungsweise Wärmebehandlungsergebnisse liefert. Es fand dabei sowohl eine Härtesteigerung mittels Umwandlungshärtung in DoE2 & DoE6 statt, als auch Anlassvorgänge in den restlichen Versuchen. Das Anlassen kann die Härte verringern und die Duktilität erhöhen (siehe Kapitel Wärmebehandlung).
Wie in Abbildung 6.8 erkennbar ist, wird die erreichbare Härte stark von der zur Verfügung stehenden Leistung und dem gewählten Vorschub beeinflusst. Es wird vermutet, dass die Einstellungen im unteren Leistungsspektrum nicht ausreichend Leistungsdichte zur Verfügung stellen konnten, um die notwendigen Umwandlungstemperaturen für eine Härtesteigerung zu erreichen. Klar erkennbar ist auch die negative Steigung der Effektlinie v, es zeigt sich, dass eine Reduktion der Interaktionszeit mittels Erhöhung des Vorschubes dazu führt, dass weniger Energie in das Werkstück eingekoppelt wird, sprich die Maximaltemperaturen lediglich dafür ausreichen, um einen Anlassvorgang durchzuführen. Der Einfluss der Fokuslage auf erreichbare Härtewerte, in dem vorliegenden Prozessfenster, liefert kaum Evidenz für eine verwertbare Aussage.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

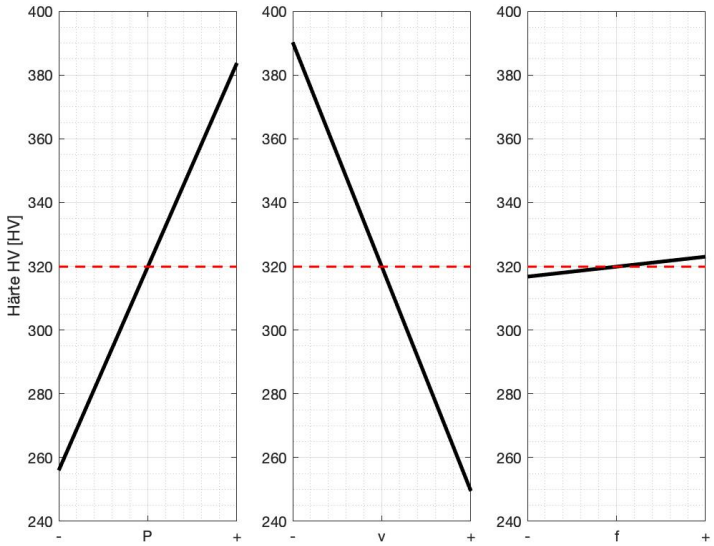


Abbildung 6.8: Haupteffektdiagramm Härte

Absorptionsgrad HA

Der Absorptionsgrad wurde rechnerisch in Kapitel 5 ermittelt. Mittels Kontrastmethode wurden die Auswirkungen der Parametervariation auf die Zielgrößen ermittelt und in Abbildung 6.9 zusammengefasst.

	Leistung **P**	Vorschub **v**	Fokuslage **f**	Absorptionsgrad **HA** [%]
	−	−	−	13.5
	+	−	−	22.4
	−	+	−	13.5
	+	+	−	18.8
	−	−	+	11.4
	+	−	+	19.6
	−	+	+	12.5
	+	+	+	20.5
MW +	20.325	16.325	16	
MW −	12.725	16.725	17.05	
Effekt	7.6	-0.4	-1.05	

Tabelle 6.6: Effektberechnung HA

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

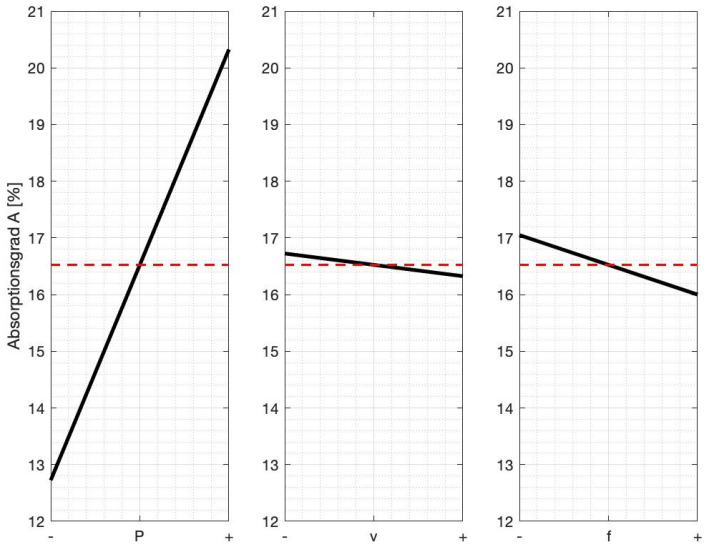


Abbildung 6.9: Haupteffektdiagramm Absorptionsgrad

Es wurde ermittelt, dass der Absorptionsgrad vor allem von der Leistungseinstellung, ergo der vorherrschenden Temperatur, abhängt. Dies ist in Abbildung 6.9 durch die starke positive Steigung der Effektlinie bei Wechsel der Leistung von Minimum auf Maximum erkennbar. Der Bereich des Absorptionsgrades liegt dabei im unteren Leistungsspektrum bei ungefähr 11% und bewegt sich mit der Leistungssteigerung auf um die 22%. Dawes et al. haben eine positive Temperaturabhängigkeit des Absorptionsgrades detailliert beschrieben, siehe [27].

Wie bereits anfänglich vermerkt, wurde der Absorptionsgrad indirekt über die numerische Lösung der Wärmeverteilung im Probenkörper ermittelt. Bei dieser Herangehensweise ist es nötig, die Umgebungsbedingungen während des Probendurchlaufs genau zu kennen, um valide Ergebnisse zu generieren.

Weiters sieht man im Haupteffektdiagramm des Absorptionsgrades, dass die Vorschubgeschwindigkeit und Fokuslage geringe Auswirkung auf den Absorptionsgrad aufweisen. Die Steigung dieser beiden Effektlinien weist eine plausible Ausprägung auf, da zu erwarten ist, dass sich eine Erhöhung von v & f negativ auf die Absorption auswirkt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

6.4.3 Wechselwirkungen

Die bisherige Analyse der Versuchsführung beleuchtet lediglich direkte Auswirkungen einzelner Faktoren auf die Qualitätsmerkmale. Es ist dem Prozess dienlich, eine genaue Analyse betreffend der Abhängigkeit und dem Einfluss der Faktoren zueinander durchzuführen. Dieses Verhalten wird Wechselwirkung genannt und tritt auf, wenn der Effekt eines Faktors von der Faktoreinstellung eines anderen abhängt oder beeinflusst wird. Dahingehend müssen nun sämtliche Einstellungen berücksichtigt werden, um detaillierte Aussagen treffen zu können.
Die Vorgangsweise wird nachfolgend Schritt für Schritt am Qualitätsmerkmal *Härtespurbreite* dargelegt. Die Berechnung (und Implementierung in MATLAB) der weiteren Wechslewirkungen *Härte* und *Absorptionsgrad* erfolgt analog dazu.

Härtespurbreite HB

Wie bereits in der Einleitung dieses Abschnittes erwähnt, soll nachfolgend der Vorgang zur Ermittlung der Interaktionen erklärt werden. Tabelle 6.7 enthällt alle Faktoren und die dazugehörigen Wechselwirkungen des Qualitätsmerkmals Härtespurbreite. Dabei werden drei Zweifachwechselwirkungen erstellt, auf Wechselwirkungen höherer Ordnung (dreifach, in diesem Fall) wird verzichtet, da wenig Aussagen generiert werden, die zur Optimierung des Sachverhaltes dienlich sind [25, S.20].

	Leistung **P**	Vorschub **v**	Fokuslage **f**	**P** × **v**	**P** × **f**	**v** × **f**	Härtespurbreite **HB** [mm]
y_1	−	−	−	+	+	+	1.8
y_2	+	−	−	−	−	+	2.8
y_3	−	+	−	−	+	−	0.75
y_4	+	+	−	+	−	−	1.55
y_5	−	−	+	+	−	−	0.8
y_6	+	−	+	−	+	−	2.4
y_7	−	+	+	−	−	+	0.6
y_8	+	+	+	+	+	+	1.6
MW +	2.0875	1.125	1.35	1.4375	1.6375	1.7	$\bar{y}_{HB} = 1.54mm$
MW −	0.9875	1.95	1.725	1.6375	1.4375	1.375	
Effekt	1.1	-0.825	-0.375	-0.2	0.2	0.325	

Tabelle 6.7: Effektberechnung HB

Da die Zweifachwechselwirkung zu ermitteln ist, müssen immer zwei Faktoren (beginnend

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

bei Leistung P und Vorschub v) und die dazugehörige Ausprägung des Qualitätsmerkmals Härtespurbreite betrachtet werden. Dabei werden die acht Versuchsdurchgänge anhand ihrer Stufenkodierung zusammengefasst, es wird ein Mittelwert gebildet, und anschließend können die Ergebnisse in einem Interaktionsdiagramm, siehe Abbildung 6.11, dargestellt werden.

DoE Nr.	Leistung **P**	Vorschub **v**	Interaktion **P**×**v**	Härtespurbreite **HB** [mm]
y_1 & y_5	−	−	+	1.3
y_3 & y_7	−	+	−	0.675
y_2 & y_6	+	−	−	2.6
y_4 & y_8	+	+	+	1.575

Tabelle 6.8: Interaktion P × v auf HB

DoE Nr.	Leistung **P**	Fokuslage **f**	Interaktion **P**×**f**	Härtespurbreite **HB** [mm]
y_1 & y_3	−	−	+	1.275
y_5 & y_7	−	+	−	0.7
y_2 & y_4	+	−	−	2.175
y_6 & y_8	+	+	+	2

Tabelle 6.9: Interaktion P × f auf HB

DoE Nr.	Vorschub **v**	Fokuslage **f**	Interaktion **v**×**f**	Härtespurbreite **HB** [mm]
y_1 & y_2	−	−	+	2.3
y_5 & y_6	−	+	−	1.6
y_3 & y_4	+	−	−	1.15
y_7 & y_8	+	+	+	1.1

Tabelle 6.10: Interaktion v × f auf HB

Parallele Interaktionsgeraden werden als synergistische Interaktionen definiert, somit sind die Einstellungen des einen Faktors unabhängig von der Einstellung des gegenübergestellten Faktors, ergo existiert keine Wechselwirkung zwischen den betrachteten Faktoren, bezogen auf das Qualitätsmerkmal. Im Gegensatz dazu tritt bei Faktoren mit sich schneidenden Interaktionsgeraden eine starke Wechselwirkung auf, diese werden als antagonistisch wechselwirkend bezeichnet. Bei letzteren beeinflussen (wechselwirken)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

die Faktoren miteinander, was erhebliche Auswirkungen auf das Qualitätsmerkmal haben kann, positiv als auch negativ. Nachfolgend sollen die Ergebnisse betreffend dieser Standpunkte interpretiert werden [25, S.24ff].

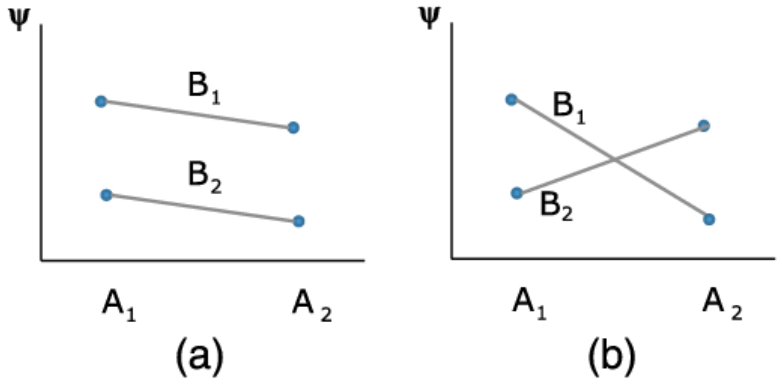


Abbildung 6.10: synergistische (a) und antagonistische (b) Wechselwirkung [28]

In Abbildung 6.11 sind nun die Zweifachwechselwirkungen der Faktoren auf Qualitätsmerkmal Härtespurbreite zusammengefasst. Betrachtet man $P \times v$, so kann man erkennen, dass sich die Härtespurbreite bei Veränderung der Leistung von Minimum auf Maximum signifikant verändert, gleiches gilt für die Variation der Vorschubgeschwindigkeit. Die Härtespurbreite weist ein Maximum bei der Einstellung $P^{+}v^{-}$ auf und das jeweilige Minimum bei $P^{-}v^{+}$. Da die beiden Geraden jedoch annähernd parallel zueinander ferlaufen, kann eine signifikante Interaktion ausgeschlossen werden. $P \times f$ verhält sich ähnlich zu $v \times f$, beide Interaktionsdiagramme weisen eine leichte Tendenz zur Interaktion auf.

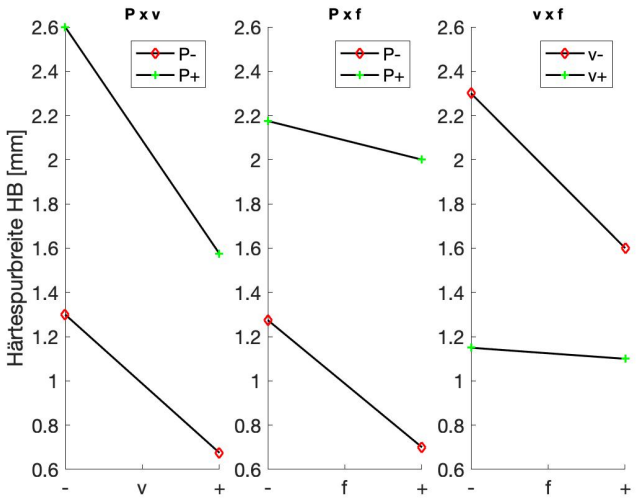


Abbildung 6.11: Interaktionsdiagramm Härtespurbreite

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

Härte HV

Die Berechnung der Wechselwirkungen für die Härtewerte erfolgt analog zur oben erklärten Methode. In Tabelle 6.11 sind alle Faktoreinstellungen und dazugehörigen Auswirkungen auf das Qualitätsmerkmal Härte HV dargestellt. Diese werden schrittweise in Tabelle 6.12 - 6.14 aufgearbeitet und anschließend visualisiert.

	Leistung **P**	Vorschub **v**	Fokuslage **f**	**P** × **v**	**P** × **f**	**v** × **f**	Härte **HV** [HV0.5]
	−	−	−	+	+	+	226
	+	−	−	−	−	+	538
	−	+	−	−	+	−	266
	+	+	−	+	−	−	237
	−	−	+	+	−	−	266
	+	−	+	−	+	−	579
	−	+	+	−	−	+	266
	+	+	+	+	+	+	229
MW +	395.75	249.5	335	239.5	325	314.75	$\bar{y}_{HV} = 320$
MW −	256	402.25	316.75	412.25	326.75	337	
Effekt	139.75	-152.75	18.25	-172.75	-1.75	-22.25	

Tabelle 6.11: Effektberechnung HV

DoE Nr.	Leistung **P**	Vorschub **v**	Interaktion **P**×**v**	Härte **HV** [HV0.3]
y_1 & y_5	−	−	+	246
y_3 & y_7	−	+	−	266
y_2 & y_6	+	−	−	558.5
y_4 & y_8	+	+	+	233

Tabelle 6.12: Interaktion P × v auf HV

Betrachtet man in Abbildung 6.12 die Wechselwirkung $P \times v$ auf das Qualitätsmerkmal Härte HV, so ist ersichtlich, dass die Härte ein Maximum bei P^+v^- und ein Minimum bei P^+v^+ aufweist.
Die sich schneidenden Interaktionsgeraden weisen auf einen antagonistischen Effekt hin. Im unteren Leistungsspektrum P^-v^- und P^-v^+ sind nur geringe Auswirkungen auf die Härtewerte erkennbar, wohingegen die Veränderung von P^+v^- auf P^+v^+ signifikante Auswirkungen auf das Qualitätsmerkmal hat. Dies lässt sich damit erklären, dass im

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

DoE Nr.	Leistung **P**	Fokuslage **f**	Interaktion **P**×**f**	Härte **HV** [HV03.]
y_1 & y_3	−	−	+	246
y_5 & y_7	−	+	−	266
y_2 & y_4	+	−	−	387.5
y_6 & y_8	+	+	+	404

Tabelle 6.13: Interaktion P × f auf HV

DoE Nr.	Vorschub **v**	Fokuslage **f**	Interaktion **v**×**f**	Härte **HV** [HV0.3]
y_1 & y_2	−	−	+	382
y_5 & y_6	−	+	−	422.5
y_3 & y_4	+	−	−	251.5
y_7 & y_8	+	+	+	247.5

Tabelle 6.14: Interaktion v × f auf HV

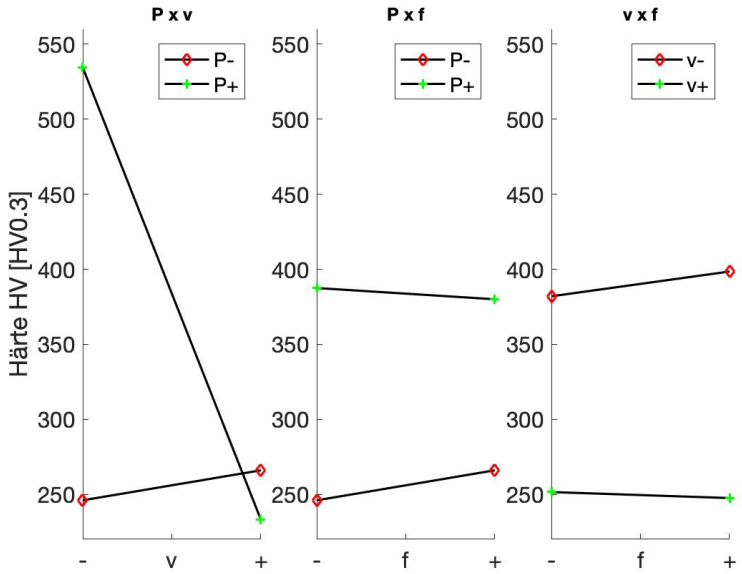


Abbildung 6.12: Interaktionsdiagramm Härte

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

unteren Leistungsspektrum (P^-) unabhängig von der Vorschubsgeschwindigkeit das Material angelassen wird. Der verstärkte Anlasseffekt bei P^+v^+ lässt vermuten, dass bei erhöhter Vorschubgeschwindigkeit die vorliegende Energiedichte nicht ausgereicht hat die Austenitisierungstemperatur zu erreichen. Die erhöhte Energiedichte bei P^+v^+ vermag es, die Grundhärte des Materials durch höheren Energieeintrag weiter herabzusetzen im Vergleich zu P^-v^-. Hier zeigen sich die Vorteile der statistischen Versuchsauswertung, da zwei Materialbearbeitungsprozesse (Härten und Anlassen) abgebildet werden, und es weiters möglich ist, auf den verantwortlichen Faktor zurückzuschließen.

Absorptionsgrad HA

Wie in oben angeführten Abschnitten wird in diesem Teil der Arbeit die Wechselwirkung der Faktoren auf das Qualitätsmerkmal Absorptionsgrad HA betrachtet. Der Absorptionsgrad ist im Vergleich zur Härtespurbreite und Härte ein numerisch ermittelter Wert, der über die Wärmeverteilung im Körper ermittelt wurde, die genaue Vorgehensweise ist im Kapitel 5 aufgeführt. Nachfolgende Tabelle 6.11 fasst die Ergebnisse zusammen, die in Tabelle 6.16 bis 6.18 zu Interaktionen gruppiert werden.

	Leistung **P**	Vorschub **v**	Fokuslage **f**	**P** × **v**	**P** × **f**	**v** × **f**	Absorptionsgrad **HA** [%]
	−	−	−	+	+	+	13.5
	+	−	−	−	−	+	22.4
	−	+	−	−	+	−	13.5
	+	+	−	+	−	−	18.8
	−	−	+	+	−	−	11.4
	+	−	+	−	+	−	19.6
	−	+	+	−	−	+	12.5
	+	+	+	+	+	+	20.5
MW +	20.325	16.325	16	16.05	16.775	17.225	$\bar{y}_{HA} = 16.5\%$
MW −	12.725	16.725	17.05	17	16.275	15.825	
Effekt	7.6	-0.4	-1.05	-0.95	0.5	1.4	

Tabelle 6.15: Effektberechnung HA

Abbildung 6.13 visualisiert die Wechselwirkungen der einzelnen Faktoren auf das Qualitätsmerkmal HA. $P \times f$ sowie $P \times v$ weisen eine synergistische Ausprägung auf, somit ist mit keiner Interaktion zwischen den jeweiligen Faktoren zu rechnen. $v \times f$ zeigt eine antagonistische Ausprägung, eine Wechselwirkung zwischen Vorschubgeschwindigkeit und Fokuslage in Hinsicht auf den Absorptionsgrad ist zu erwarten. Wie anfangs

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

bereits erwähnt wurde der Absorptionsgrad numerisch ermittelt und die Ausprägungen von HA bei v^+f^+ sowie v^-f^+ unterscheiden sich um 1%. Um die antagonistische Beziehung dieser Wechselwirkung zu untersuchen, wären weitere Analysen erforderlich, die den Rahmen dieser Arbeit übersteigen würden.

DoE Nr.	Leistung **P**	Vorschub **v**	Interaktion **P×v**	Absorptionsgrad **HA** [%]
y_1 & y_5	−	−	+	12.45
y_3 & y_7	−	+	−	13
y_2 & y_6	+	−	−	21
y_4 & y_8	+	+	+	19.65

Tabelle 6.16: Interaktion P × v auf HA

DoE Nr.	Leistung **P**	Fokuslage **f**	Interaktion **P×f**	Absorptionsgrad **HA** [%]
y_1 & y_3	−	−	+	13.5
y_5 & y_7	−	+	−	11.95
y_2 & y_4	+	−	−	20.6
y_6 & y_8	+	+	+	20.05

Tabelle 6.17: Interaktion P × f auf HA

DoE Nr.	Vorschub **v**	Fokuslage **f**	Interaktion **v×f**	Absorptionsgrad **HA** [%]
y_1 & y_2	−	−	+	17.95
y_5 & y_6	−	+	−	15.5
y_3 & y_4	+	−	−	16.15
y_7 & y_8	+	+	+	16.5

Tabelle 6.18: Interaktion v × f auf HA

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

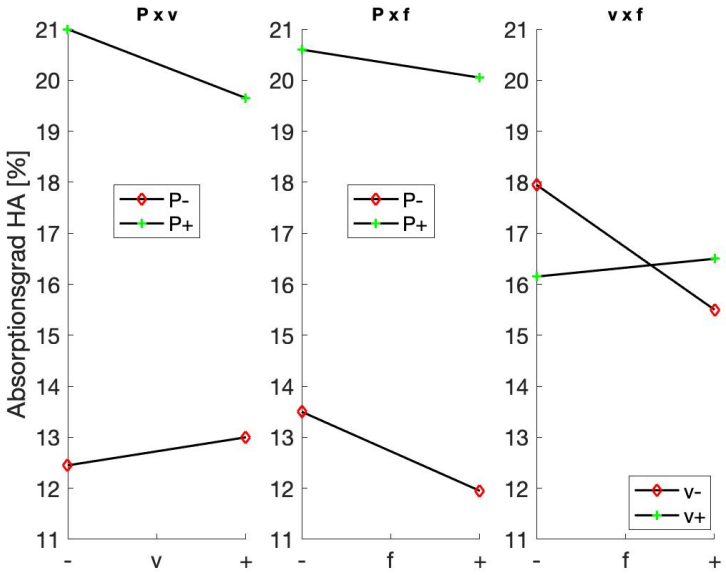


Abbildung 6.13: Interaktionsdiagramm Absorptionsgrad

6.4.4 Lineares Beschreibungsmodell

Nachdem die Wirkung der Haupteffekte und Wechselwirkungen auf Qualitätsmerkmale untersucht wurde, soll anschließend eine Gleichung gefunden werden, welche die physikalischen Zusammenhänge im Modell „Wärmebehandlung mittels Laserbestrahlung“ quantifizieren soll. Es soll ein Regressionsmodell erstellt werden, welches Vorraussagen treffen kann, wie unterschiedliche Parametereinstellungen auf die Zielgrößen wirken. Ein derartiges Beschreibungsmodell für drei Faktoren ist wie folgt aufgebaut:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_{12} + a_{13}x_{13} + a_{23}x_{23} \tag{6.4}$$

Nachfolgend eine allgemeine Notation, welche für eine beliebige Anzahl an Faktoren gültig ist:

$$y = c_0 + \sum_{i=1}^{n_f} c_i x_i + \sum_{i=1}^{n_{f-1}} \sum_{j=i+1}^{n_f} c_{ij} x_i x_j \tag{6.5}$$

Es folgt für die Eingangsgrößen x_i mit den dazugehörigen Modellkonstanten c_i ein Näherungswert des Qualitätsmerkmals $\hat{y}$. In diesem Modell sind Haupteffekte und Wechselwirkungseffekte vereint. Des Weiteren ist der Gesamtmittelwert der Qualitätsmerkmale vermerkt. Anfänglich wurde die Normierung der Faktoren auf den Wertebereich -1 & $+1$ festgelegt, somit ist die Stufenbreite der Faktoren in der beschreibenden Gleichung 2. Daher müssen Effekte durch 2 dividiert werden, um zu Modellkonstanten überführt werden zu können. Die Konstanten haben anschließend die Einheit des Qualitätsmerk-

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

mals. Das geschätzte Qualitätsmerkmal in der betreffenden Einstellung hat die Notation $\hat{y}$, während der Gesamtmittelwert mit $\bar{y}$ gekennzeichnet wird. Für die Eingangsgrößen x_i werden die kodierten Werte -1 und $+1$ eingesetzt.

$$\hat{y} = \bar{y} + \frac{E_A}{2}x_1 + \frac{E_B}{2}x_2 + \frac{E_C}{2}x_3 + \frac{E_{AB}}{2}x_{12} + \frac{E_{AC}}{2}x_{13} + \frac{E_{BC}}{2}x_{23} \tag{6.6}$$

Aus den Daten von Tabelle 6.6, 6.11 und 6.15 sollen nun anschließend die jeweiligen linearen Beschreibungsmodelle nach Gleichung 6.6 erstellt werden.

$$\hat{y}_{HB} = 1.54 + 0.55\ x_1 - 0.4125\ x_2 - 0.1875\ x_3 - 0.1\ x_{12} + 0.2\ x_{13} + 0.1625\ x_{23} \tag{6.7}$$

$$\hat{y}_{HV} = 319.88 + 63.875\ x_1 - 70.375\ x_2 + 3.125\ x_3 - 80.375\ x_{12} - 6.875\ x_{13} - 5.125\ x_{23} \tag{6.8}$$

$$\hat{y}_{HA} = 16.53 + 3.8\ x_1 - 0.2\ x_2 - 0.525\ x_3 - 0.475\ x_{12} + 0.25\ x_{13} + 0.7\ x_{23} \tag{6.9}$$

Das lineare Beschreibungsmodell bietet den Vorteil, dass die Wirkung einer Vielzahl von Faktoren, mit einer vergleichsweise geringen Anzahl an Versuchsdurchläufen, beschrieben werden kann. Des Weiteren werden Wechselwirkungen ebenfalls effektiv aufgenommen und analysiert. Es wird ein anschauliches, verständlich aufbereitetes Modell präsentiert, um das Systemverhalten zu veranschaulichen, insbesondere im Entscheidungsfindungsprozess der Führungskräfte [23, S.23ff].

6.4.5 Response Surface Method

Die generierten Daten aus den Versuchsläufen werden im letzten Schritt verwendet, um mittels der Response Surface Methode die Optima der jeweiligen Qualitätsmerkmale unter Variation der Einflussgrößen zu visualisieren. Für die Regression wird ein Polynom zweiter Ordnung herangezogen. Da nun neben den Haupteffekten auch die Wechselwirkungen einfließen, entsteht eine dreidimensionale Ebene mit den jeweiligen Minima und Maxima. Dabei wird das Qualitätsmerkmal immer zwei Faktoren gegenübergestellt. Folgendes Polynom zweiter Ordnung wird für die Erstellung der RSM herangezogen:

$$f(x, y) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot y + a_3 \cdot x \cdot y \tag{6.10}$$

Vergleicht man das verwendete Polynom mit Gleichung 6.6, so erkennt man, dass das Qualitätsmerkmal (HB, HA od. HV) als $f(x, y)$ definiert wird (Ausgangsgröße), die Faktoren (P, v od. f) werden auf x sowie y gesetzt. Wie bereits erwähnt, komplementieren

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

die Wechselwirkungen der Faktoren ($P \times v$, $P \times f$ od. $v \times f$) das für den Konturplot notwendige Polynom. Die Ausgleichsrechnung wurde mittels dem MATLAB - Tool cftool durchgeführt. Die notwendigen statistischen Grundbegriffe sowie die Ergebnisse werden in den nachfolgenden Seiten aufgeführt.

Goodness of Fit

Um das, mittels statistischer Daten, erstellte Modell darauf zu überprüfen, wie gut es Beobachtungen erklären kann, wird ein Anpassungstest, auch bekannt als Goodness of Fit, durchgeführt. Im Allgemeinen wird dabei die Abweichung von erwarteten und beobachteten Datenpunkten miteinander verglichen.
Dabei wird mittels generierter Kennzahlen die Güte beurteilt, diese sollen anschließend angeführt und deren Bedeutung erklärt werden um die Response Surfaces fundiert analysieren zu können.

Residuenquadratsumme SSE

Bei der Residuenquadratsumme handelt es sich, wie der Name bereits andeutet, um die Summe der quadrierten Residuen. Als Residue bezeichnet man die Abweichung zwischen beobachteter Ausprägung eines Merkmales und der, aus dem Modell folgenden, erwarteten Ausprägung des zugrundeliegenden Merkmals. Nimmt SSE einen kleinen Wert ein, so kann davon ausgegangen werden, dass die Zufallsfehlerkomponente gering ist.

$$SSE = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_i)^2 \tag{6.11}$$

Bestimmtheitsmaß R^2

Das Bestimmtheitsmaß zeigt an, wie erfolgreich das Modell die Streuung der Daten abbilden beziehungsweise erklären kann. Alternativ kann gesagt werden, dass R^2 das Quadrat der Korrelation zwischen tatsächlichen und erwarteten Werten ist. Definiert ist R^2 als das Verhältnis zwischen Regressionsquadratsumme (SSR) und totaler Quadratsumme (SST).

$$SSR = \sum_{i=1}^{n} (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2 \tag{6.12}$$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

$$SST = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2 \tag{6.13}$$

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \tag{6.14}$$

Das Bestimmtheitsmaß ist eine dimensionlose Zahl, die Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann. Je näher R^2 bei 1 liegt, desto eher ist ein perfekt linearer Zusammenhang zu erwarten. Bei $R^2 = 1$ folgt, dass sich die abhängige Variable y vollständig mittels des zugrundeliegenden Modells beschreiben lässt.
Geht $R^2 \to 0$, so liegt kein linearer Zusammenhang vor, und das erstellte Regressionsmodell weist geringere Güte auf.

adjustiertes Bestimmtheitsmaß

Mit steigendem Grad des zugrundeliegenden Polynoms wächst automatisch auch das Bestimmtheitsmaß, obgleich das Modell nicht verbessert wird. Um diesen Sachverhalt zu berücksichtigen, wird das sogenannte adjustierte Bestimmtheitsmaß eingeführt, dieses berücksichtigt den Einfluss der Freiheitsgrade der Residuen (DFE) auf die Modellgüte. Der Freiheitsgrad v wird ermittelt aus der Differenz zwischen der Anzahl der Qualitätsmerkmale (n=8) und der Anzahl der Koeffizienten ($m = 4$) im verwendenten Polynom 6.10.

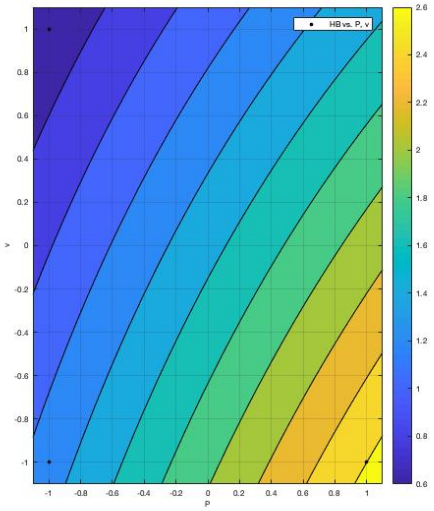
$$v = n - m = 4 \tag{6.15}$$

$$R^2_{adj.} = 1 - \frac{SSE(n-1)}{SST(v)} \tag{6.16}$$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

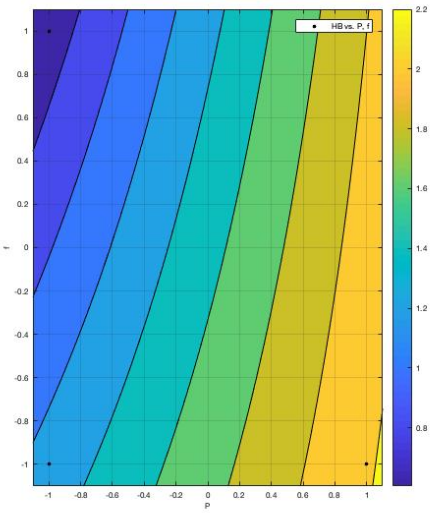
Härtespurbreite HB

Vergleicht man die Polynomskoeffizienten, die mittels MATLAB cftool berechnet wurden, mit jenen oben angeführten Ergebnissen des linearen Beschreibungsmodells (Kontrastmethode), so ist ersichtlich, dass diese bis auf die Berücksichtigung der Stufenkodierung übereinstimmen (Division durch Anzahl der Stufen muss berücksichtigt werden).



Polynomskoeff.		Goodness of Fit	
a_0	1.538	SSE	0.5925
a_1	0.55	R^2	0.867
a_2	-0.4125	$R^2_{adj.}$	0.7672
a_3	-0.1	RMSE	0.3849

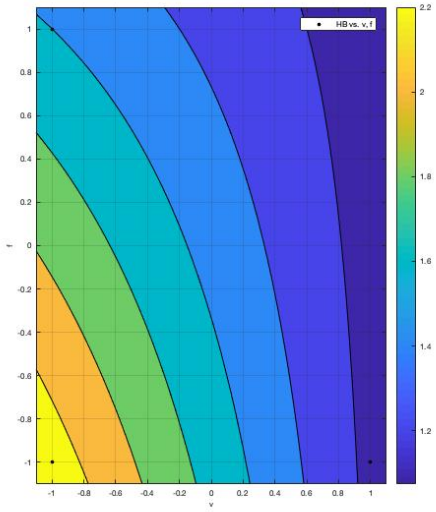
Abbildung 6.14: RSM $P \times v \times HB$



Polynomskoeff.		Goodness of Fit	
a_0	1.538	SSE	1.672
a_1	0.55	R^2	0.6245
a_2	-0.1875	$R^2_{adj.}$	0.3428
a_3	0.1	RMSE	0.6466

Abbildung 6.15: RSM $P \times f \times HB$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub



Polynomskoeff.		Goodness of Fit	
a_0	1.538	SSE	2.6
a_1	-0.4125	R^2	0.4162
a_2	-0.1875	$R^2_{adj.}$	-0.02161
a_3	0.1625	RMSE	0.8062

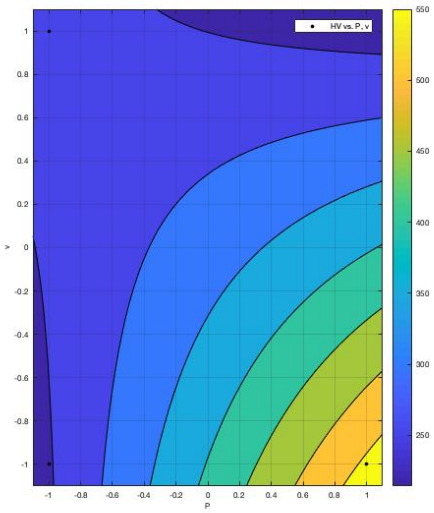
Abbildung 6.16: RSM $v \times f \times HB$

Das Beschreibungsmodell für $P \times v \times HB$ weist mit einem adjustierten Bestimmtheitsmaß von $R^2_{adj.} = 0.7672$ die größte Modellgüte für das Qualitätsmerkmal Härtespurbreite auf. In Anwendungsfällen, in denen die räumliche Ausdehnung der Härtespur optimiert werden soll, ist es zweckdienlich, dies mit einer Parametervariation von Leistung und Vorschub zu bewerkstelligen. Die Anpassung der Härtespurbreite mittels Defokussierung ist in dieser spezifischen Anwendung weniger effektiv, da das Laserstrahlprofil (Gaußstrahl) nicht für großflächige Bearbeitungsflächen ausgelegt ist.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

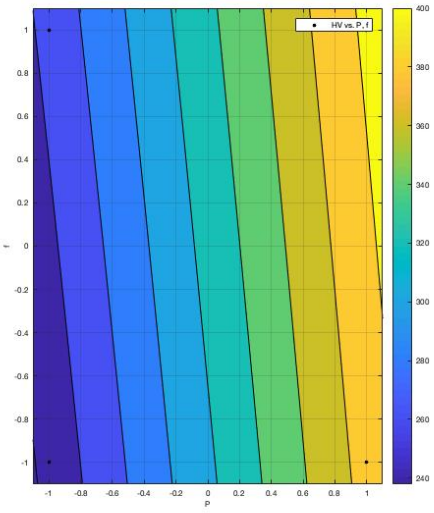
Härte HV

Die Modifikation der Härte des zugrundeliegenden Probenkörpers ist mitunter eines der Hauptaugenmerke dieser Arbeit. Während der Versuchführung wurde ersichtlich, dass zwei Wärmebehandlungsprozesse abgebildet werden, neben einer Laserumwandlungshärtung wurde auch das Anlassen mittels Laserbestrahlung erfasst. Wie bei der Härtespurbreite lässt sich die zu erwartende Härte am besten mittels Leistung und Vorschub einstellen. Ein $R^2_{adj.} = 0.988$ ist ein guter Wert, der ein stabiles Beschreibungsmodell liefert.



Polynomskoeff.		Goodness of Fit	
a_0	319.9	SSE	856.5
a_1	63.87	R^2	0.9931
a_2	-70.37	$R^2_{adj.}$	0.988
a_3	-80.37	RMSE	14.63

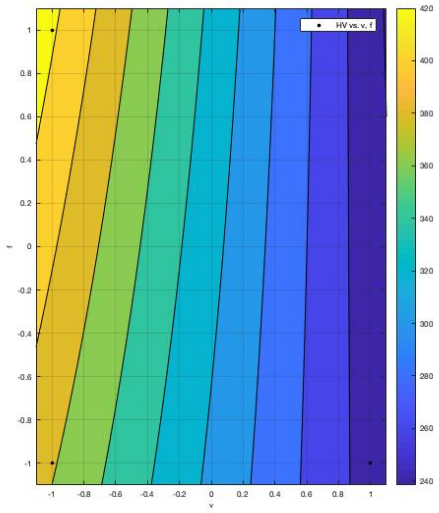
Abbildung 6.17: RSM $P \times v \times HV$



Polynomskoeff.		Goodness of Fit	
a_0	319.9	SSE	9.17e+04
a_1	63.88	R^2	0.2652
a_2	3.125	$R^2_{adj.}$	-0.2859
a_3	-6.875	RMSE	151.4

Abbildung 6.18: RSM $P \times f \times HV$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

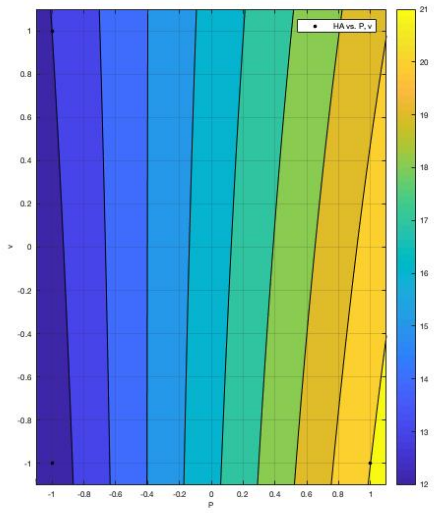


Polynomskoeff.		Goodness of Fit	
a_0	319.9	SSE	8.489e+04
a_1	-70.37	R^2	0.3198
a_2	3.125	$R^2_{adj.}$	-0.1904
a_3	-5.125	RMSE	145.7

Abbildung 6.19: RSM $v \times f \times HV$

Absorptionsgrad HA

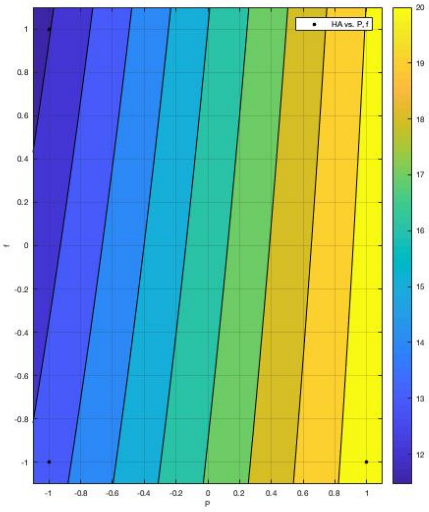
Neben der oben beschriebenen Härte ist der Absorptionsgrad jene Eigenschaft, der die größte Aufmerksamkeit geschenkt wurde. Dieses Qualitätsmerkmal wurde im Vergleich zu den anderen nicht direkt gemessen sondern über die Temperaturverteilung im Körper numerisch rückgerechnet. Die Modelle $P \times v \times HA$ und $P \times f \times HA$ weisen beide eine hohe Güte auf und eignen sich daher zu Optimierungszwecken der Absorption.



Polynomskoeff.		Goodness of Fit	
a_0	16.52	SSE	8.07
a_1	3.8	R^2	0.9358
a_2	-0.2	$R^2_{adj.}$	0.8877
a_3	-0.475	RMSE	1.42

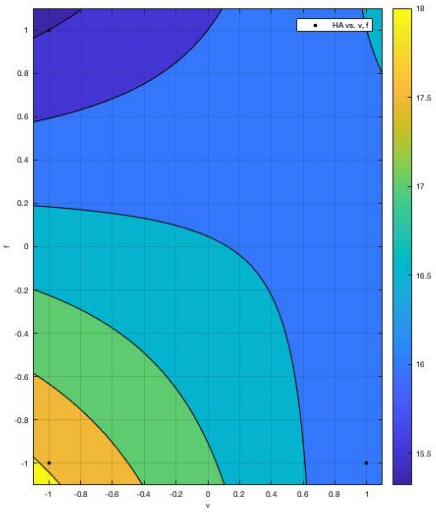
Abbildung 6.20: RSM $P \times v \times HA$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN



Polynomskoeff.		Goodness of Fit	
a_0	16.52	SSE	7.49
a_1	3.8	R^2	0.9404
a_2	-0.525	$R^2_{adj.}$	0.8957
a_3	0.25	RMSE	1.368

Abbildung 6.21: RSM $P \times f \times HA$



Polynomskoeff.		Goodness of Fit	
a_0	16.53	SSE	119.3
a_1	-0.2	R^2	0.05127
a_2	-0.525	$R^2_{adj.}$	-0.6603
a_3	0.7	RMSE	5.461

Abbildung 6.22: RSM $v \times f \times HA$

Analog zu den obigen beiden Qualitätsmerkmalen zeigt auch bei der Absorption das Modell $v \times f \times$ *Qualitätsmerkmal* die geringste Modellgüte auf. In allen vorliegenden Fällen ist das adjustierte Bestimmtheitsmaß negativ, was auf einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen den beiden Faktoren schließen lässt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde eine Möglichkeit beschrieben, einen unbekannten Absorptionsgrad für die Laserwärmebehandlung zu ermitteln. Dies wurde mittels Temperaturmessung an der Rückseite der Proben und anschließender Berechnung der Wärmeverteilung innerhalb des Probenkörpers durchgeführt. Die Lösung der Wärmeleitungsgleichung berücksichtigt die Ausdehung des Laserstrahlprofils und bietet eine numerisch ermittelbare Lösung für endliche Körper und kleine Zeitwerte. Das gewählte Prozessfenster erlaubte die Analyse des Umwandlungshärtens als auch des Anlassens des Werkstückes.
Die generierten Daten des Absorptionsgrades wurden zusammen mit weiteren Qualitätsmerkmalen für eine statistische Versuchsführung herangezogen. Deren Verhalten und Wechselwirkung während der Variation definierter Faktoren wurde beobachtet und in ein Beschreibungsmodell überführt. Die daraus entstandenen Modelle sollen einen Beitrag zur Optimierung der Laserwärmebehandlung von Dualphasenstählen beitragen. Sämtliche Vorgänge zur Bildung des Design of Experiments können flexibel in anderen Fachbereichen angewandt werden.

7.2 Ausblick

Die Laserwärmebehandlung ist ein innovatives Verfahren zur Modifikation von Materialien, welches noch etliche Untersuchungsmöglichkeiten bietet. Die Erkenntnisse dieser Arbeit können weiterverwendet werden, um folgende Punkte näher zu analysieren:

- Das Prozessfenster so wählen, dass Laserumwandlungshärten und Laseranlassen getrennt voneinander untersucht werden. Diese Einschränkung könnte einen Beitrag dazu leisten, die Modelle spezifisch für das jeweilige Verfahren zu optimieren.
- Das Umwandlungshärten von Dünnblechen stellt eine besondere Herausforderung dar, aufgrund geringer Menge umgebenden Materials und infolge dessen eingeschränkter Selbstabschreckungsfähigkeit. Um diese zu verbessern, wird empfohlen, den Einsatz von Wärmesenken zu analysieren. Als Wärmesenke kann hierbei ein Werkstück mit abweichenden Wärmeleitfähigkeiten eingesetzt werden. Die in das bestrahlte Werkstück eingebrachte Wärmeenergie wird in das angrenzende artfremde Material abgeführt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

8 Anhang

IPG LASER	Test Results Ytterbium Fiber Laser Model YLR-1500-CT S/N 7071850	Form: Revision: Page:	38229 9 1 of 12

The information and the following charts provided below is the result of tests performed in controlled environments by IPG Laser. These provided useful, but not warranted, information about the functions and performance of the product.

	Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min	Typ.	Max	Test Results	Unit
	Optical characteristics							
1.	Operation mode			CW, QCW			CW, QCW	
2.	Nominal output power	P_{nom}		1500			1545	W
3.	Output power tuning range			10		105	10 - 103	%
4.	Emission wavelength	λ	P_{out} = 1500 W	1070		1080	1070.5	nm
5.	Emission linewidth	$\Delta\lambda$	P_{out} = 1500 W		3	6	4.0	nm
6.	Switching ON time		P_{out} = 1500 W		80	100	< 40	µsec
7.	Switching OFF time		P_{out} = 1500 W		80	100	< 25	µsec
8.	Output power modulation rate		P_{out} = 1500 W			5.0	5.0	kHz
9.	Output power instability		T_{water} = const over 8 hrs		1.0	2.0	2.0 over 9 hrs	%
	Optical output							
10.	Internal fiber/fiber coupler			installed			tested	
11.	Beam parameter product* at entrance to fiber/fiber coupler	BPP* ($1/e^2$)	Feeding fiber core Ø 50 µm length 5 m		2.0	2.5	1.7	mm*mrad
12.	Beam parameter product* at output of fiber/fiber coupler	BPP* ($1/e^2$)	Process fiber core Ø 100 µm length 10 m			4.0	2.8	mm*mrad
13.	Process fiber length			10			10	m
	General characteristics							
14.	Operation voltage, three phases			400 - 460/3P+PE			tested	VAC
15.	Power consumption		P_{out} = 1500 W		5	6	4.8	kW
16.	Laser cooling water flow rate		T = 20 – 22°C	8			13	l/min
	Control and service interfaces							
17.	Analogue power output monitor		P_{out} = 0 W P_{out} = P_{nom}		0 8		0 8	V V
18.	Analogue control (control and modulation of the pump laser diode current)	Type of the connector: Han® 7 D, female part on the laser side: Pin 1 - AIN_POS; Pin 2 – AGND. External analogue voltage input 0...+10 VDC. Output power control voltage in external control mode. 0 V - 10 V corresponds to 0% - 100% pump current. Static accuracy ± 2 %; response time ≤ 50 µs					tested	
19.	Industrial Ethernet (communications with an external PC for laser monitoring and control)	Connector type: HARTING RJ45 DATA 3A PANEL FEED THROUGH Communication rate 100 Mbit					tested	
20.	Laser ON/OFF (digital laser modulation)	Pin A1, A2 of Han® 25 D connector. 0 V – Laser OFF, 24 V – Laser is ON. Maximum modulation rate 5 kHz					tested	
21.	Hardwiring (laser control from robot)	Type of the connector: Han® 64 D, female part on the laser side					tested	
22.	Laser safety interface (emergency shut-down function)	Medium: Han® 25 D, female part on the laser side					tested	

** Measurement accuracy by means of Primes Focus Monitor ± 10 %*

Date: **22.08.2007**

Tested by: _____ **Dipl. Eng. B. Sivov**

Approved by: _____ **Dr. V. Fomin**

Approved by: _____ **Dr. G. Sargsyan**

Abbildung 8.1: Protokoll Laser S.1

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

	Test Results Ytterbium Fiber Laser Model YLR-1500-CT S/N 7071850	Form: 38229 Revision: 9 Page: 2 of 12

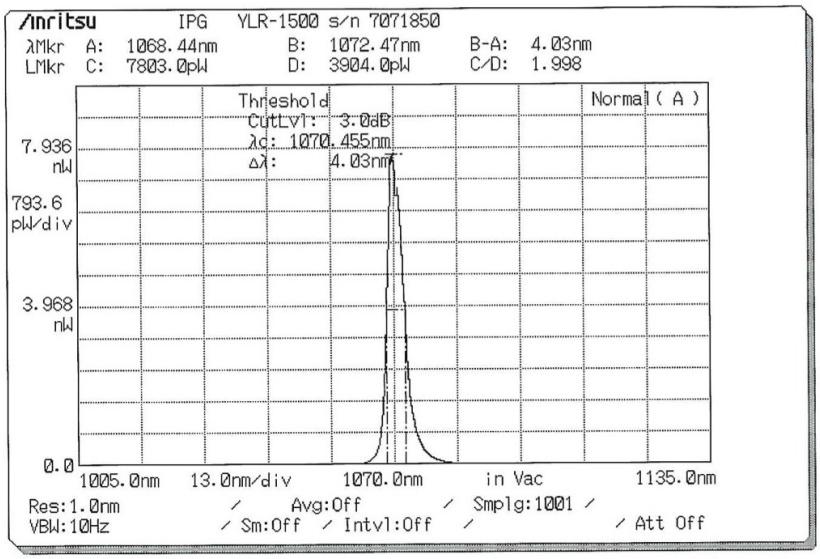


Fig. 1 **Output spectrum**

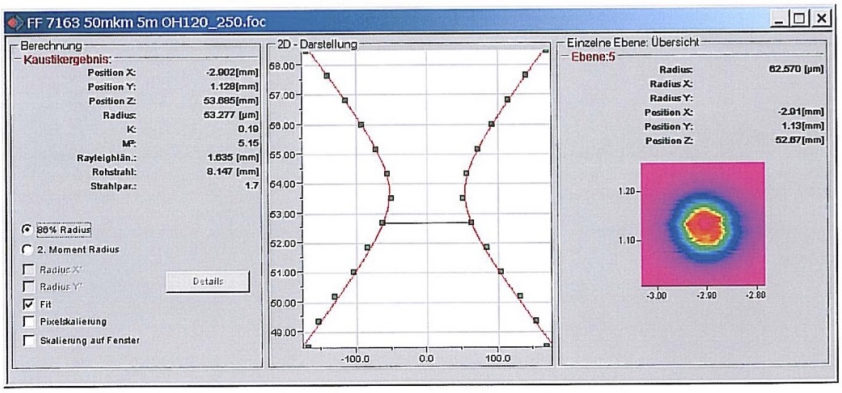


Fig. 2 **Beam parameter product of 1.7 mm x mrad after the 5 m of feeding fiber ∅ 50 µm and optical head F120/F250, measured by means of Primes Focus Monitor FM-120**

Abbildung 8.2: Protokoll Laser S.2

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

IPG LASER	Test Results Ytterbium Fiber Laser Model YLR-1500-CT S/N 7071850	Form: Revision: Page:	38229 9 3 of 12

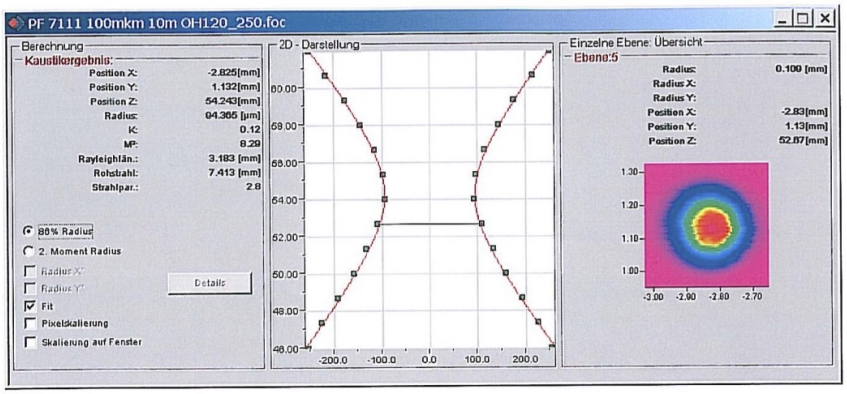


Fig. 3 **Beam parameter product of 2.8 mm x mrad after the 10 m of process fiber ∅ 100 µm and optical head F120/F250, measured by means of Primes Focus Monitor FM-120**

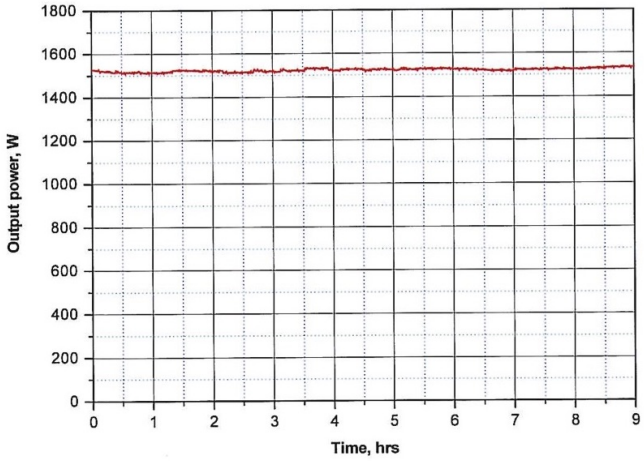


Fig. 4 **Output power vs. time after the 10 m of process fiber ∅ 100 µm over 9 hours**

Abbildung 8.3: Testbericht Laser S.3

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

Abbildungsverzeichnis

2.1 Prinzipskizze Laseraufbau [1] 8
2.2 Transversale Intensitätsverteilung 9
2.3 Gauß - Strahl 10
2.4 Stimulierte Emission 11
2.5 Verstärkung im Resonator [3] 11
2.6 Allgemeine Eigenschaften des Laserstrahls [5] 12
2.7 Lasersystem 13

3.1 Schliff DP1000 (Fa.SSAB) 16
3.2 Mechanische Eigenschaften in Abhängigkeit des Martensit Volumenanteils [6] 17
3.3 Mechanische Eigenschaften verschiedener AHHS [9] 17
3.4 Wärmeführung zur Einstellung eines gleichmäßigen DP-Gefüges [9] 18
3.5 Schematische Wärmebehandlung 19
3.6 Gleichgewichtsschaubild & Martensitgitter 20
3.7 Temperatureigenschaften während der Laserwärmebehandlung 22
3.8 Einfluss der Probendicke, links Blechdickenreduktion von 2.5mm (blau) auf 1mm, rechts Reduktion v
3.9 Effektive Abkühldauer in Abhängigkeit der Plattendicke [11] 23

4.1 Metallografischer Schliff der Probe DoE2 26
4.2 Möglichkeiten der Temperaturmessung 26
4.3 Prinzipskizze der Messschaltung 27
4.4 Kennlinien von Thermoelementen nach DIN EN 60 584 28
4.5 Temperaturauswertung DoE1 - DoE4 29
4.6 Temperaturauswertung DoE5 - DoE8 30
4.7 Prüfprinzip nach Vickers 31
4.8 Mindestdicke in Abhängigkeit der Prüfkraft 31
4.9 Mindesstabstand der Eindrücke 32
4.10 Verlauf der Oberflächenhärtemessung 32
4.11 Mittlere Oberflächenhärte des Grundmaterials 33
4.12 Gemessene Oberflächenhärte DoE1 34
4.13 Gemessene Oberflächenhärte DoE2 34
4.14 Gemessene Oberflächenhärte DoE3 35

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

4.15 Gemessene Oberflächenhärte DoE4 35
4.16 Gemessene Oberflächenhärte DoE5 36
4.17 Gemessene Oberflächenhärte DoE6 36
4.18 Gemessene Oberflächenhärte DoE7 37
4.19 Gemessene Oberflächenhärte DoE8 37
4.20 Härteverlauf über Werkstückdicke 38
4.21 Temperaturverlauf über Werkstückdicke nach Glg. 5.39 39

5.1 Schliff DoE2 (2.5x) 40
5.2 Intensitätsverlauf im absorbierenden Medium [4] 42
5.3 Wärmeleitung in Folge von Konduktion [18] 43
5.4 DoE2 Schliff und Temperaturverlauf 49

6.1 Prozess Versuchsführung 53
6.2 Systembeschreibung 55
6.3 Versuchsdurchgang 1 56
6.4 Fokussierung eines Gauß - Strahls [26] 57
6.5 Versuchsplan - vollfaktoriell 59
6.6 Härtespurbreiten im Vergleich 61
6.7 Haupteffektdiagramm Härtespurbreite 62
6.8 Haupteffektdiagramm Härte 65
6.9 Haupteffektdiagramm Absorptionsgrad 66
6.10 synergistische (a) und antagonistische (b) Wechselwirkung [28] 69
6.11 Interaktionsdiagramm Härtespurbreite 69
6.12 Interaktionsdiagramm Härte 71
6.13 Interaktionsdiagramm Absorptionsgrad 74
6.14 RSM $P \times v \times HB$ 78
6.15 RSM $P \times f \times HB$ 78
6.16 RSM $v \times f \times HB$ 79
6.17 RSM $P \times v \times HV$ 80
6.18 RSM $P \times f \times HV$ 80
6.19 RSM $v \times f \times HV$ 81
6.20 RSM $P \times v \times HA$ 81
6.21 RSM $P \times f \times HA$ 82
6.22 RSM $v \times f \times HA$ 82

8.1 Protokoll Laser S.1 84
8.2 Protokoll Laser S.2 85

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

8.3 Testbericht Laser S.3 86

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Tabellenverzeichnis

2.1 Laserprofil nach 100μm Arbeitsfaser 13
2.2 Leistungsdichte in Abhängigkeit der Eingangsparameter 15

4.1 Zusammenfassung Prozessfenster 24
4.2 Chemische Zusammensetzung [12] 24
4.3 Materialeigenschaften 25
4.4 Auswertung DoE2 25
4.5 Ergebnisse DoE1 39

5.1 Absorptionsgrad in Abhängigkeit der Eingangsparameter 52

6.1 Versuchsplannung Zusammenfassung 55
6.2 Zusammenfassung Prozessfenster 58
6.3 Versuchsplan 59
6.4 Effektberechnung HB 61
6.5 Effektberechnung HV 64
6.6 Effektberechnung HA 65
6.7 Effektberechnung HB 67
6.8 Interaktion P $\times$ v auf HB 68
6.9 Interaktion P $\times$ f auf HB 68
6.10 Interaktion v $\times$ f auf HB 68
6.11 Effektberechnung HV 70
6.12 Interaktion P $\times$ v auf HV 70
6.13 Interaktion P $\times$ f auf HV 71
6.14 Interaktion v $\times$ f auf HV 71
6.15 Effektberechnung HA 72
6.16 Interaktion P $\times$ v auf HA 73
6.17 Interaktion P $\times$ f auf HA 73
6.18 Interaktion v $\times$ f auf HA 73

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Literatur

[1] Sheila Black und Louise Jobling. „Physical principles of LASER“. In: *Anaesthesia & Intensive Care Medicine* 15.11 (Nov. 2014), S. 530–532. DOI: 10.1016/j.mpaic.2014.08.003.

[2] N. Bohr. „I. On the constitution of atoms and molecules“. In: *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 26.151 (Juli 1913), S. 1–25. DOI: 10.1080/14786441308634955.

[3] Elijah Kannatey-Asibu. *Principles of Laser Materials Processing*. Wiley, 2009. ISBN: 978-0-470-17798-3. URL: https://www.wiley.com/en-us/Principles+of+Laser+Materials+Proc

[4] Helmut Hügel und Thomas Graf. *Laser in der Fertigung*. Vieweg+Teubner, 2009. DOI: 10.1007/978-3-8348-9570-7.

[5] Keyence. *Laser Glossary*. 2019. URL: https://www.keyence.com/ss/products/marking/marking_centr

[6] Urs Liedl. „Anfangsverformungs- und Alterungsverhalten von Dual-Phasen-Stahl“. Diss. Technische Universität München, Dez. 2002, S. 99.

[7] Günter Schulze. *Die Metallurgie des Schweißens*. Springer Berlin Heidelberg, 2010. DOI: 10.1007/978-3-642-03183-0.

[8] Ylva Granbom. *Structure and mechanical properties of dual phase steels - An experimental and theoretical analysis*. Stockholm: KTH, 2010. ISBN: 978-91-7415-740-6.

[9] C.C. Tasan u. a. „An Overview of Dual-Phase Steels: Advances in Microstructure-Oriented Processing and Micromechanically Guided Design“. In: *Annual Review of Materials Research* 45.1 (Juli 2015), S. 391–431. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070214-021103.

[10] F. Vollertsen, K. Partes und J. Meijer. *State of the Art of Laser Hardening and Cladding*. Undefined. Hrsg. von E. Beyer u. a. 14. Juni 2005.

[11] Sangwoo So und Hyungson Ki. „Effect of specimen thickness on heat treatability in laser transformation hardening“. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 61 (Juni 2013), S. 266–276. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.01.048.

[12] SSAB AB. *Werkstoffeigenschaften DP1000*. 2019. URL: https://www.ssab.de/produkte/warenzeichen/

[13] S. Krajewski und J. Nowacki. „Dual-phase steels microstructure and properties consideration based on artificial intelligence techniques“. In: *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 14.2 (2014), S. 278–286. ISSN: 1644-9665. DOI: https://doi.org/10.1016/j.acm URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1644966513001234.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

[14] Matthias Nau. *Elektrische Temperaturmessung - mit Thermoelementen und Widerstandsthermometern*. Techn. Ber. Fulda: JUMO GmbH, 2004.

[15] Wolfgang Zinth und Ursula Zinth. *Optik*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag Verlag, 2013. Kap. 2, S. 23–24. DOI: 10.1524/9783486735819.

[16] Richard P. Feynman, Robert B. Leighton und Matthew Sands. *Feynman Lectures on Physics 1: Mainly Mechanics, Radiation, and Heat*. Hachette Book Group USA, 1. Okt. 2011. Kap. 31-4. 560 S. ISBN: 0465024939.

[17] D. Burger. „Optimierung der Strahlqualität beim Laserhärten“. In: *Laser/Optoelektronik in der Technik / Laser/Optoelectronics in Engineering*. Springer Berlin Heidelberg, 1990, S. 492–495. DOI: 10.1007/978-3-642-48372-1_104.

[18] Yunus A. Cengel. *Heat Transfer: A Practical Approach*. Mcgraw-Hill, 2002. ISBN: 9780072458930.

[19] H. S. Carslaw. *Conduction of Heat in Solids*. OUP Oxford, 27. März 1986. 522 S. ISBN: 0198533683.

[20] Anton Hossner. *Einführung in die Höhere Mathematik*. Springer Vienna, 1949. DOI: 10.1007/978-3-7091-3877-9.

[21] Sagar Sarkar u. a. „Analysis of temperature and surface hardening of low carbon thin steel sheets using Yb-fiber laser“. In: *Surface and Coatings Technology* 302 (Sep. 2016), S. 344–358. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.06.045.

[22] Milton Abramowitz und Irene A. Stegun. *Handbook of Mathematical Functions*. Dover Publications Inc., 1. Juni 1965. 1046 S. ISBN: 0486612724. URL: http://people.math.sfu.c

[23] Karl Siebertz, David van Bebber und Thomas Hochkirchen. *Statistische Versuchsplanung*. Springer Berlin Heidelberg, 2010. DOI: 10.1007/978-3-642-05493-8.

[24] Robert Bielak u. a. „Simulation of forming processes with local heating of dual phase steels with use of laser beam shaping systems“. In: *Computer Optics* 40 (Jan. 2016), S. 659–667.

[25] Jiju Antony. *Design of Experiments for Engineers and Scientists*. Elsevier Science, 22. Feb. 2014. 220 S.

[26] Jan-Philipp Weberpals. *Nutzen und Grenzen guter Fokussierbarkeit beim Laserschweißen*. Utz Verlag GmbH, 6. Juli 2010. 144 S. ISBN: 3831609950.

[27] Christopher Dawes. *Laser welding*. Woodhead Publishing Limited, 1992. DOI: 10.1533/978184569

[28] Sergio A. Orjuela u. a. „Selection of optimal texture algorithms for evaluating degradation of carpets through experimental design“. In: *Journal of Electronic Imaging* 22.3 (Aug. 2013), S. 033020. DOI: 10.1117/1.jei.22.3.033020.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub