



David Philipp Constantin Theuermann, BSc. IWE

Integrierte und kontaktlose Temperaturkontrolle beim Elektronenstrahlschweißen

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau

eingereicht an der

Technische Universität Graz

Betreuer:

Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Enzinger

Dipl. Ing. Florian Pixner, IWE

Institut für Werkstoffkunde, Fügetechnik und Umformtechnik
Institutsvorstand: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christof Sommitsch

Graz, im September 2019

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....

date

.....

(signature)

Kurzfassung

Inhalt dieser Diplomarbeit ist die Entwicklung und Validierung eines Schutzmechanismus für ein bereits vorhandenes Einkanalpyrometer. Hauptaufgabengebiet dieser Messeinheit ist die Temperaturmessung und -aufzeichnung additiv erzeugter Bauteile aus der Titanlegierung Ti-6Al-4V, welche mittels Elektronenstrahlschweißung hergestellt werden.

Im Zuge der ersten Versuchsreihen stellten sich aber einige Probleme in Bezug auf Einsatz und Messgenauigkeit ein. So eignet sich das Verfahren des Elektronenstrahlschweißens durch die Vakuumatmosphäre hervorragend für die Verarbeitung hochreaktiver Werkstoffe, wie z.B. Ti-6Al-4V, andererseits wird genau durch diese atmosphärischen Bedingungen die gängige Luftspülung, welche die Verunreinigung des Pyrometerobjektives verhindern soll, unterbunden. Speziell dieser verwendete Werkstoff zeichnet sich durch ein starkes Ausdampfverhalten während des Schweißprozesses aus und ist daher ohne Schutzmechanismus für das Pyrometer nicht fehlerfrei messbar. Das Ziel dieser Arbeit war daher die Entwicklung eines geeigneten Mechanismus um die Verunreinigung bzw. ein Beschlagen des Pyrometerobjektives verhindern zu können. Durch Anwendung dieses Schutzmechanismus konnten mit dem Pyrometer sowohl Emissionsbestimmungen als auch Temperaturmessungen durchgeführt werden, so dass charakteristische Temperatur-Zyklen bei additiv erzeugten Bauteilen aufgezeichnet und ausgewertet werden konnten.

Abstract

The content of this thesis is the development and validation of a protection mechanism for an existing single channel pyrometer. The main task of this measuring unit is the temperature measurement and recording of additive components made of the titanium alloy Ti-6Al-4V, which are produced by electron beam welding.

In the first series of tests, however, some problems occurred with regard to use and measuring accuracy. For example, electron beam welding in a vacuum atmosphere is ideal for processing highly reactive materials such as Ti-6Al-4V. On the other hand, it is precisely these atmospheric conditions that prevent the usual air flushing, which is intended to prevent contamination of the pyrometer lens. Especially this used material is characterized by a strong evaporation behaviour during the welding process and therefore cannot be measured without a protective mechanism for the pyrometer. The aim of this work was therefore to develop a suitable mechanism to prevent contamination or fogging of the pyrometer lens. By using this protective mechanism, both emission and temperature measurements could be carried out with the pyrometer, so that characteristic temperature cycles of additively produced components could be recorded and evaluated.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation.....	1
1.2	Ausgangssituation.....	2
1.3	Ziele bzw. Vorgehensweise.....	3
2	Theoretische Grundlagen der Arbeit	4
2.1	Verwendeter Werkstoff Ti-6Al-4V	4
2.1.1	Reinstoff Titan.....	4
2.1.2	Reinstoff Aluminium	5
2.1.3	Reinstoff Vanadium.....	6
2.1.4	Titanlegierungen und Ti-6Al-4V.....	7
2.2	Schweißtechnologie	8
2.2.1	Grundlagen zur Schweißtechnologie.....	8
2.2.2	Elektronenstrahlschweißen in Kombination mit einem additiven drahtbasierten Fertigungsprozess.....	10
2.3	Temperaturmessung	13
2.3.1	Grundlagen der Temperaturmessung.....	13
2.3.2	Definition von Wärme und Wärmeübertragung.....	15
2.3.3	Strahlung.....	16
2.3.4	Allgemeine Grundlagen der Pyrometermesstechnik.....	16
2.3.5	Grundlagen zum Messen mit Thermoelementen des Typ K	21
2.3.6	Grundlagen zu wärmeresistente Folien	22
3	Experimenteller Teil	24
3.1	Equipment.....	24
3.1.1	Elektronenschweißanlage	24
3.1.2	Werkstoff.....	25
3.1.3	Pyrometer	25
3.1.4	Pyrometer-Schutzvorrichtung.....	25
3.2	Versuchsaufbauten	31
3.2.1	Emissionsgrad.....	31
3.2.2	Additiver Strukturaufbau.....	36
4	Ergebnisse	41
4.1	Emissionsgradbestimmung	41

4.2	Additiver Strukturaufbau	50
4.2.1	Temperaturentwicklung an repräsentativen AM-Strukturen	50
4.2.1.1	AM-Struktur „Single-Wall“	52
4.2.1.2	AM-Struktur „Double-Wall“	54
4.2.1.3	AM-Struktur „Block“	56
4.3	Additive Strukturaufbauten und ihr Abkühlverhalten	59
5	Diskussion	63
5.1	Pyrometerschutz-Apparatur.....	63
5.2	Temperaturentwicklung in mehrlagig hergestellten AM Strukturen	63
5.2.1	„Single-Wall“ Struktur	64
5.2.2	„Double-Wall“ Struktur.....	67
5.2.3	„Block“ Struktur	69
5.2.4	Erkenntnisse aus der Untersuchung des Einflusses der Geometrie auf den Energietransport	71
5.2.5	Einfluss der Abkühlstrategie auf das Schweißergebnis	71
6	Zusammenfassung	75
7	Ausblick	76
	Literaturverzeichnis	79
	Abbildungsverzeichnis	82
	Tabellenverzeichnis	86
	Abkürzungsverzeichnis	87
	Anhang.....	88

1 Einleitung

Mit Hilfe dieser vorliegenden Masterarbeit soll eine Weiterentwicklung im Forschungsbereich der drahtbasierten additiven Fertigung mittels Elektronenstrahl an der Technischen Universität Graz ermöglicht werden. Zentraler Inhalt dieser Arbeit besteht in der Implementierung und Erweiterung eines Pyrometers in die additive Fertigung um eine aussagekräftige und exakte Temperaturmessung während des Prozesses sicherzustellen. Mittels der kontaktlosen Temperaturmessung sollen typische thermische Zyklen beim Aufbau von AM (additive manufacturing) Strukturen aufgezeichnet und anschließend ausgewertet werden. Die Möglichkeit der Auswertung und Interpretation von Temperaturwerten während eines Fertigungsprozesses sind essentiell für das systematische Verständnis von Problemfeldern bzw. der Handhabung von Fertigungsunregelmäßigkeiten die während eines schichtweisen Aufbaus entstehen können.

1.1 Motivation

Durch steigende Anforderungen von Kunden an die Hersteller gilt es agiler und zunehmend flexibler zu reagieren. Additive Fertigungsprozesse bieten hierbei eine interessante Ergänzung zu etablierten Fertigungsverfahren und ermöglichen ein schnelles Reagieren auf sinkende Planbarkeit und steigende Komplexität. Die Verwendung neuartiger Herstellungsverfahren ermöglicht eine kostengünstige Fertigung von Hochleistungsteilen (z.B. „fly-to-buy“ ratio) und eine reine Anwendung zur Prototypenrealisierung („Rapid Prototyping“) ist längst überholt. [1] [2]

Der Begriff additive Fertigung gilt als Überbegriff für eine Vielzahl von Technologien zu betrachten, deren Gemeinsamkeit im schichtweisen Aufbau („Layer-by-Layer“) der Bauteile besteht. Dieser schichtweise Aufbau ermöglicht eine einzigartige Gestaltungsfreiheit für Entwickler und Konstrukteure und erfüllt den Wunsch nach individuell anpassbaren Bauteilen mit variablen Losgrößen, welche schnell und einfach mittels CAD (Computer-Aided Design) verändert werden können. Diese einzigartige Möglichkeit macht die additive Fertigung zu einem idealen Begleiter für die Industrie 4.0. [3] [4]

Die Verwendung additiver Fertigungsmethoden ermöglicht den optimierten Einsatz von speziellen Metallen bzw. Legierungen welche die späteren Eigenschaften von Bauteilen entscheidend verbessern. Speziell Titan und Titanlegierungen eignen sich hervorragend für die additive Fertigung und die Herstellung von Leichtbauteilen. So hat die Luft- und Raumfahrt die Vorteile dieser Fertigungsmethoden bereits zu ihrem Vorteil entdeckt. Konventionell gefertigte Bauteile aus Ti-6Al-4V weisen eine Zugfestigkeit von 900 bis 1100 MPa auf, wohingegen die Zugfestigkeit bei Bauteilen welche additive gefertigt wurden auf bis zu 1100 bis 1300 MPa gesteigert werden konnte. So hat beispielsweise der Flugzeugbauer Airbus eine Gewichtsreduktion bei Kabinenhalterungen von bis zu 30% im Vergleich zu zuvor eingesetzten Bauteilversion erzielen können. Bei der Herstellung dieser schichtweise erzeugten Bauteile aus Tit-

anlegierungen ist der Einfluss der Mikrostruktur (in Form von $\alpha+\beta$ Bestandteilen) von entscheidender Bedeutung für die Ausbildung ausreichend hoher Festigkeits- und Zähigkeitskennwerte. Die innere Gefügestruktur ist speziell während des AM-Fertigungsverfahrens einer mehrmaligen thermischen Veränderung ausgesetzt und wandelt sich in Abhängigkeit von Temperatur und Zeit unterschiedlich um. Daher ist die Kenntnis über Temperaturentwicklungen während des Fertigungsprozesses fundamental um spezielle gewünschte mechanischen Eigenschaften erzielen zu können. Die Verwendung von herkömmlichen Temperaturmessgeräten (z.B. Thermoelementen) erweist sich aufgrund des schichtweisen Aufbaues als unzureichend um die zum Teil sehr komplexen Temperaturentwicklungen innerhalb von erzeugten Strukturen darstellen zu können. Eine elegante Alternative bieten kontaktlose Pyrometermessgeräte mit deren Hilfe die Oberflächentemperatur eines (additiv erzeugten) Bauteils unabhängig von Größe und Komplexität der Struktur an beinahe beliebiger Stelle gemessen werden kann. [1] [5]

1.2 Ausgangssituation

Das Verfahren der drahtbasierten additiven Fertigung mittels Elektronenstrahl ist bereits an der Technischen Universität Graz in Verwendung. Bei bisherigen Versuchsreihen und diversen Diplom- bzw. Masterarbeiten [6] [7] war aber eine temperaturabhängige gezielte Anpassung der Schweißparameter aufgrund der fehlenden Temperaturkennwerte des erzeugten Bauteiles nicht möglich. Zur Umsetzung einer Temperaturmessung wird ein schon durch eine vorhergehende Bachelorarbeit [8] verwendetes Pyrometer derart angepasst, dass eine Aussage zu den entstehenden Zwischenlagetemperaturen ermöglicht wird. Die wichtigsten Erkenntnisse aus den vorangegangenen Experimenten [6] [7] [8] sind:

- Eine Temperaturmessung erfolgt bis dato nur auf einen Punkt. Das Pyrometer ist fix an einem Ort verbaut und kann nur eine Stelle am Bauteil (vorzugsweise auf der Grundplatte) messen.
- Bei diversen Vorversuchen bzw. bei vorhergehenden Arbeiten wurde eine beträchtliche Ausdampfung von geschmolzenen Material beobachtet. Diese Metaldampfschicht legte sich auf den gesamten Oberflächen innerhalb der Vakuumkammer ab, auch die Schutzglasscheibe des Objektivs des Pyrometers ist betroffen. Durch die entstehende Sperrschicht werden die vom Pyrometer gelieferten Informationen bereits nach sehr kurzer Zeit unbrauchbar und es konnte daher nicht zur Temperaturmessung eingesetzt werden.
- Die Informationen welches das Pyrometer liefert wurden nicht zur Anpassung bzw. Regelung der Prozessabläufe genutzt.

1.3 Ziele bzw. Vorgehensweise

Um die erfolgreiche additive Fertigung im Forschungsbetrieb der Technischen Universität Graz verbessern zu können ist daher eine Lösung der vorher beschriebenen Problemstellungen notwendig. Die in dieser Arbeit umgesetzten Anpassungen umfassen folgende Punkte:

- Identifizierung einer geeigneten Position des Messinstrumentes um auch bei schichtweise aufgebauten Bauteilen die exakte Bauteiltemperatur am gewünschten Messort ermitteln zu können.
- Erarbeitung eines geeigneten Konzeptes um Ablagerung auf der Linsenoberfläche des Pyrometers zu verhindern.
- Entwicklung einer Schutzvorrichtung
- Testen der Schutzvorrichtung durch erste Versuchsreihen und um weitere Erkenntnisse zu generieren
- Ermittlung von thermischen Zyklen für verschiedenen Bauteilgeometrien um Aussagen über unterschiedliche Fertigungsprozesse treffen zu können.
- Integration der Messdaten in die Steuerung der Elektronenstrahlanlage um eine „*In-line-Kontrolle*“ des Fertigungsprozesses zu ermöglichen (z.B. die Steuerung des Strahlstromes in Abhängigkeit der Bauteiltemperatur $I = I(T)$)

2 Theoretische Grundlagen der Arbeit

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen anhand von Literaturquellen erörtert. Es wird auf den verwendeten Werkstoff, das Elektronenstrahlschweißen, die kontaktlose Temperaturmessung sowie auf die zur Entwicklung eines Schutzmechanismus notwendigen Hintergrundinformationen eingegangen.

2.1 Verwendeter Werkstoff Ti-6Al-4V

Wie bereits in Kapitel 1 thematisiert eignen sich besonders Titanlegierungen als Werkstoffe für die additive Fertigung und wird bereits intensiv von der Industrie genutzt. Daher dient diese Legierung als Basis für sämtliche Versuche in dieser Arbeit. Es soll zunächst auf die einzelnen Legierungselemente eingegangen werden und anschließend eine genauere Betrachtung des Werkstoffes Ti-6Al-4V vorgenommen werden.

2.1.1 Reinstoff Titan

Titan besitzt eine einzigartige Kombination aus Korrosionsbeständigkeit, Dichte und Festigkeit. Der Werkstoff ist das vierthäufigste Metall in der Erdkruste und somit in ausreichender Menge vorhanden um es industriell verarbeiten zu können. Trotz dieser Häufigkeit ist der Preis für Titan recht hoch, der Grund liegt in der schwierigen Gewinnung des Werkstoffes. Die Neigung bei höheren Temperaturen (ab ca. 500°C) atmosphärische Gase aufzunehmen macht einen teuren mehrstufigen Herstellungsprozess notwendig. Titan ist ein paramagnetisches, hartes und hochschmelzendes Metall dessen wichtigsten physikalischen Eigenschaften in Tabelle 1 aufgelistet sind: [9] [10] [11]

Tabelle 1: Physikalische Eigenschaften von reinem Titan in Anlehnung an [9] [10]

Eigenschaften	Einheit	Zahlenwert
Dichte	g/cm ³	4,51
Schmelztemperatur	°C	1668
Elastizitätsmodul	GPa	110
Ausdehnungskoeffizient	10 ⁻⁶ /K	9
elektrische Leitfähigkeit	S/m	2,5 * 10 ⁶
Härte	HB	120

Die gute Korrosionsbeständigkeit beruht, trotz eines negativen Normalpotentials, auf der Möglichkeit stark zu passivieren. Unter Passivierung versteht man die Fähigkeit eine mehrere Nanometer dicke selbstheilende Passivschicht ausbilden zu können. Diese Schicht besteht im Fall von Titan aus Titanoxid und ist dünner als 100nm Die Stärke reicht aber als Korrosionsschutz aus und hindert sogar Chlorid-Ionen vor einem Durchbrechen der Passivschicht. Diese Eigenschaft macht Titan unempfindlich gegenüber Seewasser, Chlorsalzlösungen, Hypochloriten und Salpetersäure. Unlegiertes Titan widersteht sogar der extremen Lochkorrosion von

oxidierenden Salzen wie z.B. FeCl_3 und wird aus diesen Grund sehr gerne für Entsalzungsanlagen, Tanks, Wärmetauscher, usw. verwendet. [10] [12] [13]

Unlegiertes Titan (α -Phase) besitzt bei Raumtemperatur eine hexagonale dichte Kugelpackung. Bei Erwärmung und Erreichen der Umwandlungstemperatur (ca. 882°C) wandelt sich die Struktur in eine kubisch-raumzentrierte β -Phase. In Abbildung 1 ist dieser Strukturwandel graphisch dargestellt. [10] [12] [13]

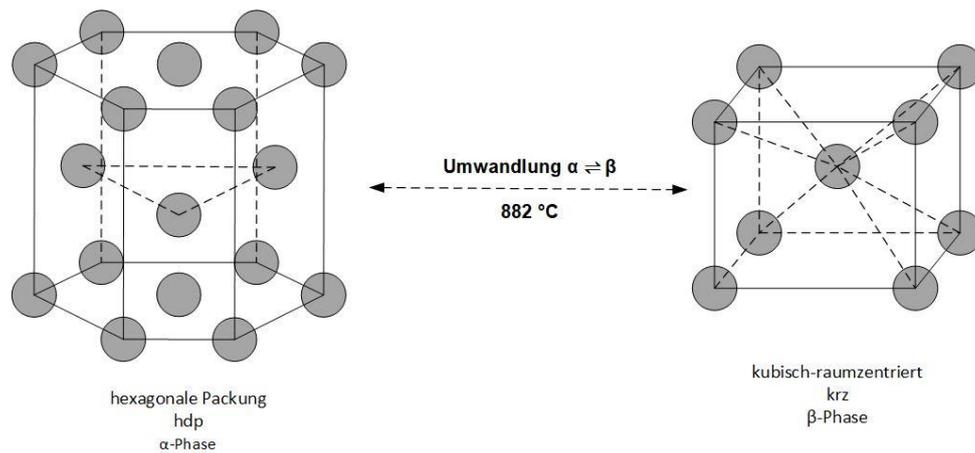


Abbildung 1: Temperaturabhängige Kristallsystemumwandlung des Reinstoffes Titan in Anlehnung an [14] [15]

2.1.2 Reinstoff Aluminium

Das Einsatzgebiet von Aluminium reicht vom Leichtbau bis zum elektrischen Leiter, der Grund dafür liegt in einem sehr gutem Verhältnis von Dichte zu Festigkeit bzw. einer hohen elektrischen Leitfähigkeit (siehe Tabelle 2). Trotz seinem häufigen Vorkommens, es ist das dritthäufigste Elemente in der Erdkruste, ist die technische Verarbeitung von Aluminium erst recht spät im 19. Jahrhundert aufgekommen. Die Gewinnung von Aluminium aus Bauxit ist sehr energieaufwendig und wird aufgrund der hohen Schmelztemperatur ($T_s = 2050^\circ\text{C}$) des Aluminiumoxids meist mittels Schmelzflusselektrolyse durchgeführt. Aluminiumoxid kommt in der Natur nur selten vor und ist als Edel- bzw. Halbedelstein in Form von Rubinen, Smaragden und Saphiren bekannt. Der Werkstoff ist aufgrund seiner Korrosionsbeständigkeit und seiner leichten Umformbarkeit ein beliebtes Baumaterial. Die Korrosionsbeständigkeit beruht auf der Passivierung mit einer etwa 1000nm dicken Oxidschicht, welche bei Beschädigung selbstaushilend ist. Die Korrosionsbeständigkeit ist gegenüber Chlorid-Ionen nur unzureichend und daher muss bei vielen technischen Anwendung, z.B. Autofelgen, eine zusätzliche Schutzschicht gegenüber Lochkorrosion vorgesehen werden. Die wichtigsten physikalischen Eigenschaften von Aluminium werden in Tabelle 2 aufgezeigt: [9] [10] [12]

Tabelle 2: Physikalische Eigenschaften von Aluminium in Anlehnung an [9] [10]

Eigenschaften	Einheit	Zahlenwert
Dichte	g/cm ³	2,7
Schmelztemperatur	°C	660
Elastizitätsmodul	GPa	70
Ausdehnungskoeffizient	10 ⁻⁶ /K	25
elektrische Leitfähigkeit	A/(V*m)	37,6 * 10 ⁶
Härte	HB	20

Typisches Anwendungsgebiet für Aluminium ist die Elektroindustrie. Zwar besitzt Aluminium nur eine elektrische Leitfähigkeit von 62% gegenüber Kupfer ist aber aufgrund der geringen Dichte überall dort in Verwendung wo ein größeres Werkstoffvolumen keine Rolle spielt (dies ist z.B. bei Hochspannungskabeln der Fall). Eine weitere wichtige Eigenschaft des kubisch-flächenzentrierten Aluminiums (siehe Abbildung 2) ist die hervorragende Kalt- als auch Warmumformbarkeit, weshalb fast alle gängigen Fertigungsverfahren bei der Umformung Anwendung finden. Typische Beispiele hierfür sind Profile in Fenster- und Türrahmen, Strangpressprofile sowie Folien in der Verpackungsindustrie. [9] [10]

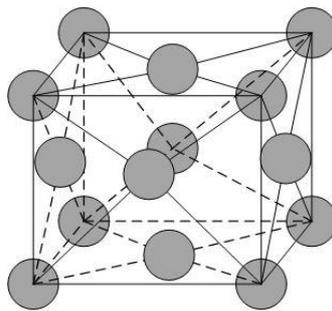
kubisch-flächenzentriert
kfz

Abbildung 2: Kristallsystem vom Reinstoff Aluminium in Anlehnung an [15]

2.1.3 Reinstoff Vanadium

Die hauptsächliche Verwendung von Vanadium erfolgt als Legierungsbestandteil von z.B. Stählen. Dieses stahlgraue, harte Metall kommt meist als Begleiter von Magneteisenerz vor und widersteht aufgrund der Ausbildung einer dünnen Oxidschicht dem Angriff von Luftsauerstoff, Laugen, Wasser und den meisten Säuren. Es gehört wie Niob und Tantal zur Vanadiumgruppe, welche durch die Lanthanidenkontraktion sehr ähnliche Eigenschaften aufweisen. Die wichtigsten Eigenschaften von Vanadium werden in Tabelle 3 aufgezeigt: [16] [17]

Tabelle 3: Physikalische Eigenschaften von Vanadium in Anlehnung an [17] [18]

Eigenschaften	Einheit	Zahlenwert
Dichte	g/cm ³	6,11
Schmelztemperatur	°C	1910
Elastizitätsmodul	GPa	128
Ausdehnungskoeffizient	10 ⁻⁶ /K	8,3
elektrische Leitfähigkeit	S/m	5,0 * 10 ⁶
Härte	HB	600

2.1.4 Titanlegierungen und Ti-6Al-4V

Durch Zugabe von Zusätzen wie Aluminium, Sauerstoff oder Zinn wird die Bildung einer hexagonalen Struktur im Titan (α -Ti) begünstigt. Im Gegenzug dazu wird durch die Zugabe von Vanadium, Eisen oder Chrom eine kubisch-raumzentrierte Struktur gefördert. Mit Hilfe dieses Wissens ist es möglich die wesentlichen Grundeigenschaften der Legierung zu steuern. Hierzu wird in 3 Strukturtypen unterschieden:

- hexagonale α -Legierungen
- kubisch-raumzentrierte β -Legierungen
- zweiphasige $\alpha+\beta$ -Legierungen

Typisches Anwendungsgebiet für Alpha und Alpha nahe Legierungen, wie z.B. TiAl5Sn2.5, ist aufgrund der guten Wärmebeständigkeit der Apparatebau in der chemischen Industrie. Die Erhöhung der Umwandlungstemperatur wird durch die gute Löslichkeit von Aluminium im hdp-Gitter ermöglicht. Während α -Legierungen eher mäßig kaltumformbar sind, weisen β -Legierungen eine wesentlich bessere Kaltumformbarkeit als auch leicht höhere Festigkeit auf. Der signifikante Nachteil ist allerdings die merklich höhere Dichte dieses β -Legierungstypen. Ein sinnvoller Kompromiss zwischen den beiden vorhergenannten Typen stellen zweiphasige $\alpha+\beta$ -Legierungen dar. Sie weisen eine hohe Festigkeit bei gleichzeitiger geringen Dichte auf, was ihre große technische Verbreitung erklärt. Besonders Ti-6Al-4V (Legierung enthält ca. 6% Aluminium und 4% Vanadium) sei hier als einer der am häufigsten verwendeten Titanlegierungen erwähnt. Die besonderen Eigenschaften dieser wärmebehandelbaren Legierung werden durch das Aluminium (erhöht die Festigkeit) als auch durch das beigemengte Vanadium (erhöht die Duktilität) erzielt. Die wichtigsten physikalischen Eigenschaften von Ti-6Al-4V werden in Tabelle 4 dargestellt. [9] [10] [12] [14]

Tabelle 4: Physikalische Eigenschaften von Ti-6Al-4V in Anlehnung an [14]

Eigenschaften	Einheit	Zahlenwert
Dichte	g/cm ³	4,43
Schmelztemperatur	°C	1655 ± 15
Elastizitätsmodul	GPa	110 – 140
Ausdehnungskoeffizient	10 ⁻⁶ /K	11
Phasentransformation $\alpha \rightleftharpoons \beta$	°C	995 ± 15

Mit steigender Temperatur kommt es zur Phasentransformation von Ti-6Al-4V, wobei die hexagonale α -Legierung und die kubisch-raumzentrierte β -Legierung in einen gemeinsamen kubisch-raumzentrierten Zustand übergeführt werden. Bei Abkühlung dieser Legierung unterhalb von 995°C kommt es zu einer Umkehrung des Effektes. Umwandlungen dieser Art beruhen auf einem Schervorgang, welcher der Martensitbildung sehr ähnlich ist. Anordnung und Größe dieser Phasen lassen sich mittels Wärmebehandlung variieren und somit auch die Eigenschaften des Werkstoffes. In Abbildung 3 wird der Umwandlungsprozess bei einer Temperatur von 995°C dargestellt. [9] [10] [12]

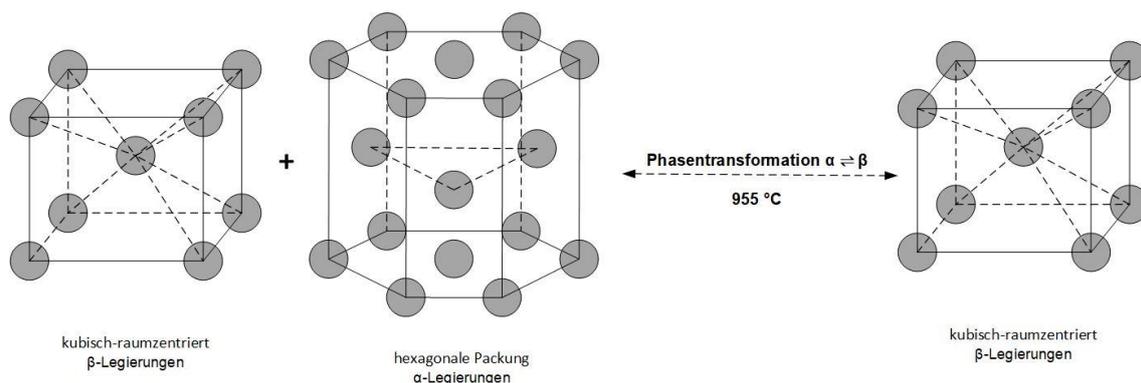


Abbildung 3: Temperaturabhängige Kristallsystemumwandlung von Ti-6Al-4V in Anlehnung an [15]

2.2 Schweißtechnologie

Im folgenden Kapitel wird ein Überblick sowohl über die Schweißtechnologie im Allgemeinen als auch über das Elektronenstrahlschweißen von Ti-6Al-4V als additiver Fertigungsprozess im Besonderen gegeben.

2.2.1 Grundlagen zur Schweißtechnologie

Schweißen ist ein Fügeprozess, bei dem unter Anwendung von Wärme und/oder Kraft es zu einer dauerhaften Verbindung von Bauteilen miteinander kommt. Nach DIN 8580 ist Schweißen ein Fertigungsverfahren welches der Hauptgruppe 4 „Fügen“ (siehe Abbildung 4) zugeordnet ist. Die Hauptgruppe 4 wird in weitere Untergruppen unterteilt, wobei hier besonders

die Untergruppe „Schmelzschweißverbindungen“ zu erwähnen ist. Typische Vertreter von Schmelzschweißverbindungen sind das Gasschmelzschweißen, Lichtbogenschweißen sowie das Schweißen mittels Laser- oder Elektronenstrahlen. Die Verfahren unterscheiden sich nach der Art der Erzeugung eines örtlich begrenzten Schmelzbades. Beim Gasschmelzschweißen erfolgt die Erschmelzung des Werkstoffes mittels Verbrennung eines Gases mit Sauerstoff, was zwar große Mobilität und gute Spaltüberbrückbarkeit erlaubt aber mit Abstand die geringste Leistungsdichte (ca. 10^3 W/cm^2) aller erwähnten Verfahren aufweist. Beim Lichtbogenschweißen kommt es durch einen Kurzschluss zur Ausbildung eines stabilen und permanent brennenden Lichtbogens. Dieser schmilzt den Werkstoff an der Fügestelle und ggf. eine Elektrode auf. Die erreichbare Leistungsdichte (ca. 10^4 W/cm^2) ist bereits um einiges höher als beim Gasschmelzschweißen. Eine Laserstrahlschweißanlage beruht auf dem Prinzip der Umwandlung von Laserstrahlen (monochromatisches, kohärentes und paralleles Licht) in Wärme. Das Prinzip des Elektronenstrahlschweißens wird in Kapitel 2.2.2 genauer beschrieben. Den beiden letzten Verfahren ist aber gemein, dass sie mit Abstand die größten Leistungsdichten (ca. 10^8 bis 10^9 W/cm^2) von allen genannten Verfahren aufweisen. [19] [20]

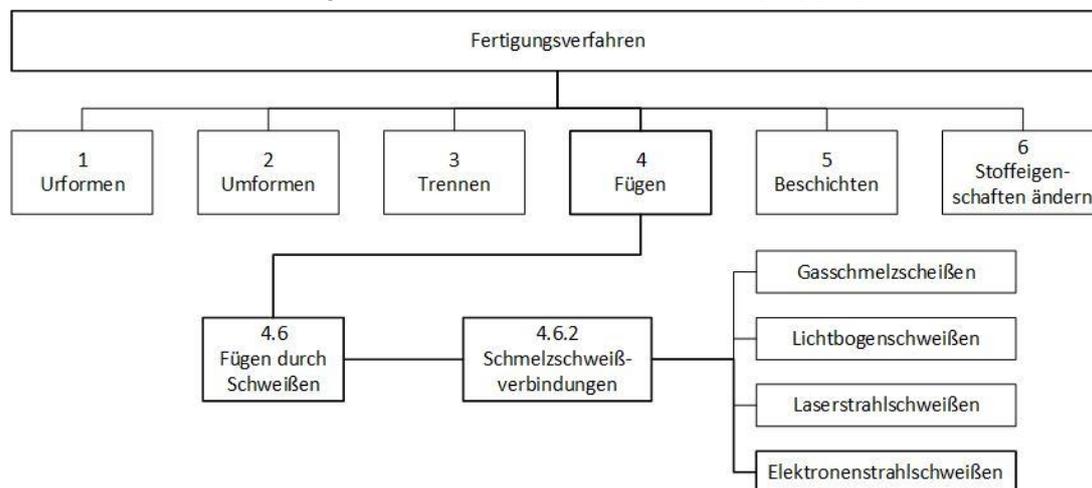


Abbildung 4: DIN 8580 in Anlehnung an [20] [21]

Der Prozess des Schweißens ist durch einen extremen Temperatur-Zeit-Zyklus gekennzeichnet. Der Werkstoff wird mit bis zu 1000 K/s aufgeheizt und in der Folge mit mehreren 100 K/s (abgekühlt). Der Bereich neben der Fusionslinie, die Wärmeeinflusszone (WEZ) erfährt daher eine unkontrollierte Wärmebehandlung, was aufgrund der kurzen Reaktionszeiten meist zu unerwünschten Gefügestrukturen führt.

Der Schweißprozess wird durch drei Merkmale, welche zusammen die Schweißbarkeit ergeben, beschrieben:

- Schweißeignung → kennzeichnet Werkstoffeigenschaften
- Schweißmöglichkeit → kennzeichnet Fertigungseigenschaften
- Schweißsicherheit → kennzeichnet Konstruktionseigenschaften

Die Schweißeignung bezieht sich auf den Werkstoff und ist dann erfüllt, wenn physikalische, chemische und metallurgische Eigenschaften eine Verbindung ermöglichen. Diese Eigenschaften haben sowohl einen großen Einfluss auf die Rissbildung, Festigkeit, Zähigkeit als auch auf die Gefügeausbildung.

Die Schweißmöglichkeit ist eine Eigenschaft der Fertigung und ist dann erfüllt, wenn die Vorbereitung, Ausführung und die Nachbereitung fachgerecht ausgeführt wurden. Weitere Faktoren sind die richtige Auswahl der Schweißzusätze, der Schweißfolge und eine richtige Wärmeleitung.

Die Schweißsicherheit bezieht sich auf die Gestaltung des Bauteils und ist dann erfüllt, wenn die vorgegebenen Belastungs- sowie Betriebszustände eingehalten werden. Dieses Merkmal nimmt daher Einfluss auf z.B. Nahtanordnungen und Bauteildicken. [12] [20]

2.2.2 Elektronenstrahlschweißen in Kombination mit einem additiven drahtbasierten Fertigungsprozess

Elektronenstrahlschweißen ist ein Sonderschweißverfahren und gehört wie bereits erwähnt zur Gruppe der Schmelzschweißverfahren (siehe Abbildung 4) und nutzt zur Wärmeenergie das Prinzip des Aufpralls von Elektronen auf eine Bauteiloberfläche. Durch den Aufprall des scharf gebündelten Elektronenstrahls wird die zum Schweißen notwendige Energie, durch Umsetzung von kinetischer Energie in Wärme, bereitgestellt. Die Erzeugung des Elektronenstrahls erfolgt mittels Generator der sich in einem Hochvakuum befindet. Dieser Elektronenstrahlerzeuger besteht aus einer Kathode, Anode und einer Steuerelektrode. Die Elektronen werden mit Hilfe der im Vakuum befindlichen thermisch angeregten Wolframelektrode erzeugt und durch die zwischen Kathode und Anode anliegende Spannung werden die Elektronen auf etwa zweidrittel der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Aufgrund der hohen Temperaturen an der Kathode muss ein besonders resistenter Kathodenwerkstoff gewählt werden, z.B. eignen sich hierfür Wolfram- und Tantallegierungen. Mit Hilfe eines Strahlenführungssystems wird der beschleunigte Elektronenstrahl auf einen geeigneten Fleckdurchmesser fokussiert. Die geschieht in mehreren Schritten, zunächst richtet eine Justierspule den

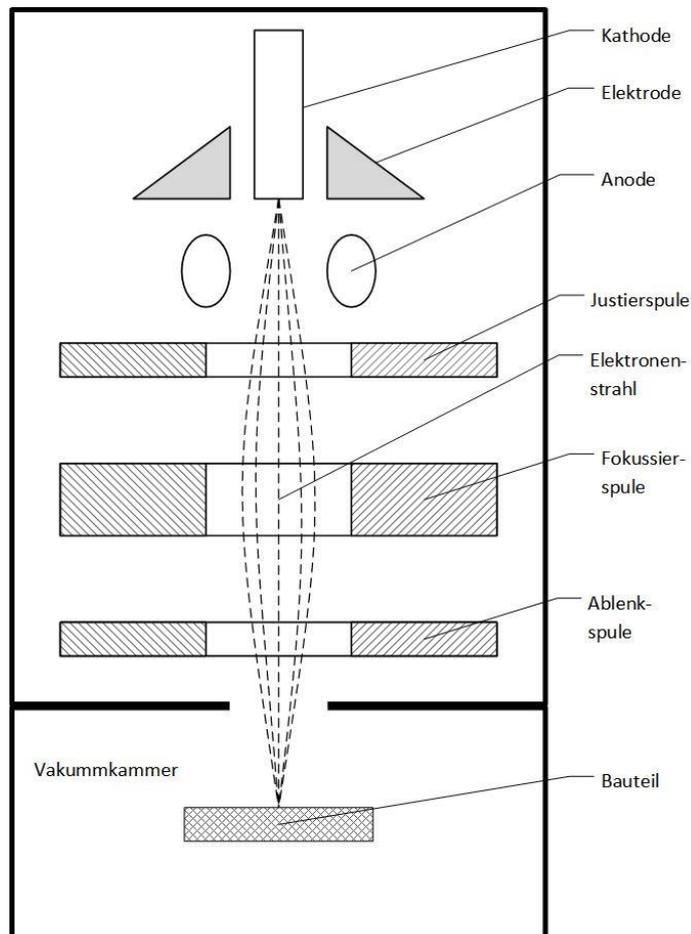


Abbildung 5: Prinzipieller Aufbau einer Elektronenstrahlanlage in Anlehnung an [17] [20]

Strahl in geeigneter Weise auf die Fokussierspule aus. Nach passieren der Hauptfokusspule wird der Strahl mittels Ablenkspule meist oszillierend auf die Werkstückoberfläche gelenkt. Beim Aufprall des scharf gebündelten Elektronenstrahls auf die Oberfläche werden die einzelnen Elektronen stark abgebremst. Ein großer Teil der kinetischen Energie wird in Wärme umgesetzt und führt angesichts der sehr hohen Leistungsdichte an der Fokussierstelle zu einem sofortigen Verdampfen des Werkstoffes. Nachfolgende Elektronen dringen dadurch tiefer in den entstehenden Kanal ein und erweitern diesen als Dampfkapillare bezeichneten Korridor. Dieser Kanal ist mit Metaldampf gefüllt und hat ungefähr den Durchmesser des Elektronenstrahls. Der Kanal selbst ist von einem zylinderförmigen Mantel aus aufgeschmolzenem Material umhüllt. Aufgrund der hohen Leistungsdichte lassen sich äußerst tiefe als auch schmale Schweißnähte realisieren. Hinzu kommt eine im Vergleich zu herkömmlichen Lichtbogenschweißverfahren äußerst schmale WEZ des Prozesses. [19] [20] [22]

Die wichtigsten Charakteristika sowie einige Vor- als auch Nachteile des Verfahrens sind in folgender Tabelle 5 übersichtlich aufgeschlüsselt.

Tabelle 5: Charakteristische Eigenschaften des Elektronenstrahlschweißens Im Vergleich zu konventionellen Verfahren in Anlehnung an [22]

Elektronenstrahlschweißen	
Charakteristika	Vorteile/Nachteile
Extrem große Leistungsdichte von ca. 10^7 bis 10^8 W/cm ²	<ul style="list-style-type: none"> • Erzeugung von sehr schmale als auch sehr tiefen Schweißnähten • schmale WEZ (Wärmeeinflusszone) • geringste Verzugswerte
Wirtschaftlichkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Tiefschweißeffect, ermöglicht kurze Fertigungszeiten • gezieltes Schweißen an mehreren Orten (Ablenkssystem) • Verbinden unterschiedlicher Werkstoffe • i.d.R. kein Zusatzwerkstoff nötig
Vakuum	<ul style="list-style-type: none"> • Im Vakuum lassen sich hochreaktive Werkstoffe problemlos schweißen • Durch Vakuum werden Anlauffarben verhindert • Hohe Nebenzeiten durch Vakuum → bzw. Sondermaschinen (Schleusen, ...)
Bauart	<ul style="list-style-type: none"> • komplexe Bauart führt zu sehr großen Investitionskosten • Baugröße der Strahlkammer ist Begrenzung für Bauteilgröße • Abschirmung gegen Röntgenstrahlung • Vielzahl an Schweißparametern sind zu berücksichtigen

Das Verfahren ist prinzipiell auch ohne Vakuum durchführbar [23], es kommt allerdings aufgrund der Kollision von Elektronen mit Luftmolekülen zu einer Streuung des Strahles (Aufweitungseffekt). Dieser Effekt bewirkt, dass bei Schweißungen unter Atmosphäreneinfluss nicht die gleiche Leistungsdichte am Fokussierpunkt erzielt werden kann wie im Vakuum. Eine un-

mittelbare Folge dieses Umstandes sind weniger tiefe erzielbare Schweißnähte sowie die Zunahme von Schweißfehlern. Viele Werkstoffe (wie z.B. Titan, Beryllium, Molybdän, Zirkonium, etc.) erfordern aufgrund ihrer großen chemische Reaktionsfreudigkeit eine Schutzgasatmosphäre bzw. ein Schweißen in Vakuum um ein nahezu vollständiges Verspröden der WEZ bzw. des Schweißgutes verhindern zu können. [12] Auch andere Effekte wie ein begünstigtes Ausgasen der Schmelze und das Unterbinden von Anlauffarben werden beim Schweißen unter Atmosphäre verhindert. Trotz dieser Nachteile sind für manche Anwendungen, wie z.B. bei der Hochgeschwindigkeitsfertigung, diese sogenannten NV-EBW Schweißungen (Non Vacuum Electron Beam Welding) aufgrund ihrer hohen Schweißgeschwindigkeit doch von Vorteil. [17] [18]

Wie bereits in Kapitel 1 festgestellt, ist eine Besonderheit der additiven Fertigung der schichtweise Aufbau. Die Idee der AM-Fertigung mittels Elektronenstrahlanlage stellt eine bis dato eher ungewöhnliche ausgeführte Kombination dar und beruht auf dem Umstand, dass beim herkömmlichen Elektronenstrahlschweißen kein Zusatzmaterial (in Form eines Schweißdrahtes) erforderlich ist. Daher stellt das Vorhandensein einer für additive Zwecke notwendigen Drahtfördereinheit in der Vakuumkammer der Anlage eine Seltenheit dar. Für die vorliegende Arbeit ist aber genau diese drahtbasierte Materialzufuhr beim additiven Elektronenstrahlschweißen von Bedeutung. Durch kontinuierliches Verfahren des Maschinentisches und Überschweißung der vorhergehenden Lagen lassen sich so drei dimensionale Objekte erzeugen (Prinzipdarstellung siehe Abbildung 6). Aufgrund dieser Überschweißungen ist dieser additiver Fertigungsprozess vergleichbar mit einer Art Mehrlagenschweißung [12] [22]

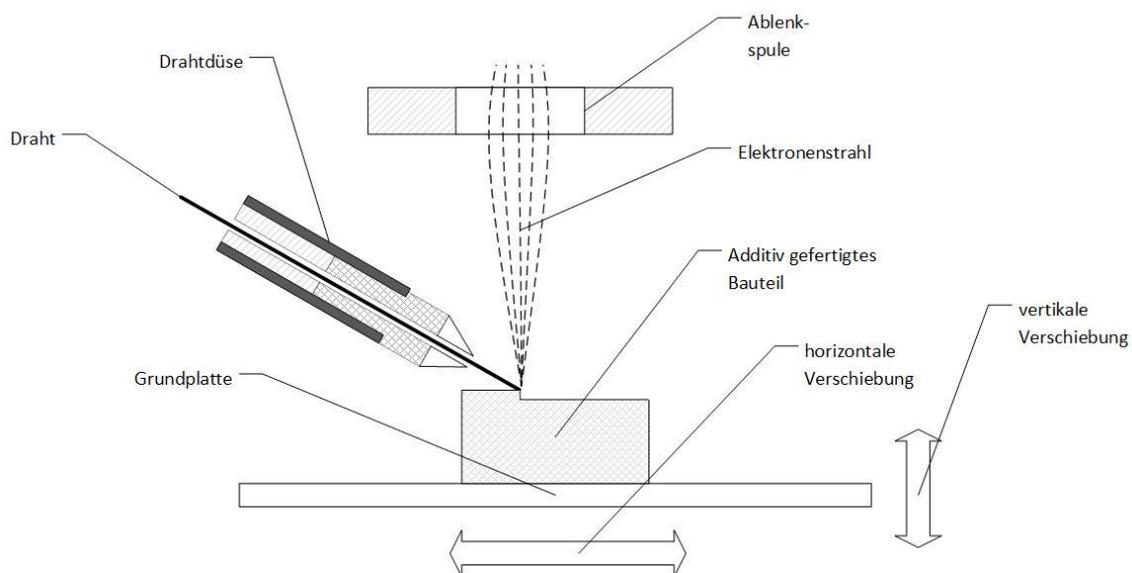


Abbildung 6: Schematische Darstellung einer drahtbasierten additiven Schweißung mittels Elektronenstrahl in Anlehnung an [19]

Beim Schweißen von hochreaktiven Werkstoffen (wie Titan und Titanlegierungen) ist prinzipiell auf die extreme chemische Reaktionsfreudigkeit zu achten. Bereits ab Temperaturen von 500°C werden atmosphärische Gase wie Sauerstoff, Wasserstoff oder Stickstoff aufgenommen, was zu Schweißfehlern wie Versprödung der WEZ und des Schweißgutes oder Oxidation der Bauteiloberfläche führen kann. Der Schweißprozess ist daher unter allen Umständen im

Vakuum bzw. unter einer Schutzgasatmosphäre durchzuführen. Bei der Schweißung von α -nahen Titanlegierungen ist es wichtig die Metallurgie zu verstehen. Der Werkstoff ist aufgrund einer Änderung der Gefügestruktur beim Abkühlen wärmebehandelbar. Diese Fähigkeit beruht auf der Umwandlung der β -Phase (über 995°C) in eine α -Phase, dabei ist die Morphologie der α - und β -Phasen sehr stark von einer gegebenenfalls thermomechanischen Behandlung während der Herstellung abhängig. Form und Größe der ehemaligen β -Körner bestimmen maßgeblich die mechanischen Eigenschaften der Schweißverbindung und sind durch die richtige Auswahl des Temperaturzyklus positiv zu beeinflussen. [8] [10]

Leider sind bis dato zum Themenbereich der additiven Fertigung von Ti-6Al-4V mittels Elektronenstrahlschweißanlage sehr wenige (siehe Diplomarbeit [7]) bis gar keine Forschungsberichte veröffentlicht worden. Aber Ergebnissen von anderen additiven Fertigungsverfahren, wie z.B. dem „Cold Metal Transfer Additive Manufacturing“ liefern erste wichtige Erkenntnisse für den verwendeten Werkstoff: [25]

- Der Aufbau der Mikrostruktur hängt stark von der Wärmeleitrichtung ab
- Es entsteht eine Lamellenstruktur aus $\alpha+\beta$ Phase mit nadelförmigen α' Martensit, welche relativ hohe Festigkeiten (ca. 1000MPa) aufweist.
- Zuvor erzeugten Schichten erfahren durch die Erzeugung neuer Lagen eine unterschiedliche thermische Behandlung (Abhängig von der Lagenanzahl).

2.3 Temperaturmessung

In diesem Kapitel werden die notwendigen Grundlagen für eine berührungslose Temperaturmessung erörtert. In Kapitel 2.3.1 wird zunächst auf den Begriff *Temperatur* eingegangen bevor die Themen *Wärme* und *Energietransport* sowie das Thema der *Wärmeleitung* behandelt werden. Kapitel 2.3.4 beschäftigt sich mit der kontaktlosen Temperaturmessung und den Abschluss bilden Grundlagen hinsichtlich der Anwendung von Thermoelementen und wärmeresistente Folien.

2.3.1 Grundlagen der Temperaturmessung

Der thermodynamische Begriff „*Temperatur*“ ist eine SI-Größe (frz. *Système international d'unités*) mit der Einheit Kelvin. Diese Basiseinheit ist unabhängig von anderen Größen definiert und hat als Bezugspunkt jenen thermodynamischen Zustand, in dem sich die drei Phasen Dampf, Wasser und Eis im Gleichgewicht befinden, der sogenannte Tripelpunkt von Wasser: [24]

$$\text{Tripelpunkt von Wasser: } T = 273.16 \text{ [K]} \quad (1)$$

Daraus ergibt sich die international gültige Definition der Einheit Kelvin, welche sich als der 273,16te Teil des Tripelpunktes von Wasser definiert. Die Messung mittels thermodynamischer Temperaturskala ist in der Praxis aufgrund des Geräte- und Zeitaufwandes sehr langwierig, weshalb diese thermodynamische durch eine praktische Temperaturskala angenähert

wird. Als Fixpunkte dieser praktischen Temperaturskala werden gerne Gleichgewichtspunkte zwischen zwei Phasen benutzt, da diese Methode eine sehr hohe Reproduzierbarkeit aufweist. Einige wichtige Bezugspunkte dieser praktischen Temperaturskala sind in Tabelle 6 aufgeführt: [24] [26]

Tabelle 6: Genormte Fixpunkte der praktischen Temperaturskala bei Normaldruck in Anlehnung an [26]

Gleichgewichtszustand	Kelvin	°Celsius
Triplepunkt des Gleichgewichtswasserstoffs	13,8033	-259,3467
Triplepunkt des Sauerstoffs	54,3584	-218,7916
Triplepunkt des Quecksilbers	234,3156	-38,8344
Triplepunkt des Wassers	273,16	0,01
Erstarrungspunkt des Zinns	505,078	231,928
Erstarrungspunkt des Aluminiums	933,473	660,323
Erstarrungspunkt des Goldes	1337,33	1064,18

Historisch beruht die Temperaturskala auf dem sogenannten Fundamentalabstand zwischen dem Schmelzpunkt (273,15 K) des Wassers bei Normaldruck, dieser Druck liegt per Definition bei 101,325kPa und dem Siedepunkt von Wasser (373,15 K) bei Normaldruck. Dieser Fundamentalabstand wird in 100 Teile zerlegt und liefert somit die uns bekannte Skala. In diesem Zusammenhang seien auch weitere übliche Temperatur Einheiten wie das °C (Celsius) oder das in den Vereinigten Staaten übliche °F (Fahrenheit) erwähnt, welcher nach folgenden Formeln umgerechnet werden können: [24]

$$\text{Celsius – Temperatur: } ^\circ C = T - T_0 \quad (2)$$

$$T_0 = 273.15 [K]$$

$$T = \text{gemessene Temperatur in } [K]$$

$$\text{Fahrenheit – Temperatur: } ^\circ F = \frac{5}{9} (^{\circ}C + 32) \quad (3)$$

Ein großes Themengebiet liefert das Feld der Temperaturmessung mittels Sensoren. Weshalb ein Überblick über mehrere thermische Effekte, welche als Basis für eine Messung verwendet werden können gegeben wird:

Tabelle 7: Auswahl an Temperaturmesstechnik in Anlehnung an [26] [27]

Temperaturmesstechnik	
Charakteristika	Anwendung
<ul style="list-style-type: none"> thermische Ausdehnung 	<ul style="list-style-type: none"> Flüssigkeits-Glasthermometern (Volumenänderung) Flüssigkeits-Federthermometer (Druckänderung)

	<ul style="list-style-type: none"> • Bimetallthermometer
<ul style="list-style-type: none"> • Änderung der elektrischen Leitfähigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Widerstandsthermometer
<ul style="list-style-type: none"> • Änderung des Temperaturkoeffizienten <ul style="list-style-type: none"> ○ positiv ○ negativ 	<ul style="list-style-type: none"> • PTC-Thermoelemente • NTC-Thermoelemente
<ul style="list-style-type: none"> • Änderung der Eigenfrequenz 	<ul style="list-style-type: none"> • Quarzthermometer
<ul style="list-style-type: none"> • Potenzialdifferenz 	<ul style="list-style-type: none"> • Typ N – Thermoelemente
<ul style="list-style-type: none"> • Absorption/Emission von Strahlung 	<ul style="list-style-type: none"> • Pyrometer

Je nach Anwendungsfall werden diese Effekte genutzt um die Temperaturänderung eines Objektes erfassbar und messbar zu machen. Die Auswahl der Methode hängt von vielen Aspekten wie z.B. dem Messbereich, der Baugröße, der Genauigkeit, dem Ansprechverhalten, der Art der Messung in Bezug auf Berührung und berührungslos, der mechanischen bzw. chemischen Beständigkeit, usw. ab. In Kapitel 2.3.4 wird dann näher auf das ausgewählte Messverfahren eingegangen. [26]

2.3.2 Definition von Wärme und Wärmeübertragung

Die heute gültigen Begriffe „Wärme“ sowie „Arbeit“ sind grundlegende Begriffe der Thermodynamik und beschreiben die Art des Energietransportes über Systemgrenzen hinweg. Mit dieser Definition ist Wärme eine Energietransportform und keine Energieform wie z.B. kinetische bzw. potenzielle Energie. In Abbildung 7 werden die zwei möglichen Energietransportformen über die Systemgrenzen hinweg graphisch dargestellt. Dabei unterscheidet sich der Begriff Wärme in zwei Punkten gegenüber Arbeit: [28]

- Energietransport entsteht zufolge einer Temperaturdifferenz
- Energietransport ist mit einer Änderung der Entropie verbunden. (Entropie ist eine Zustandsgröße der Thermodynamik)

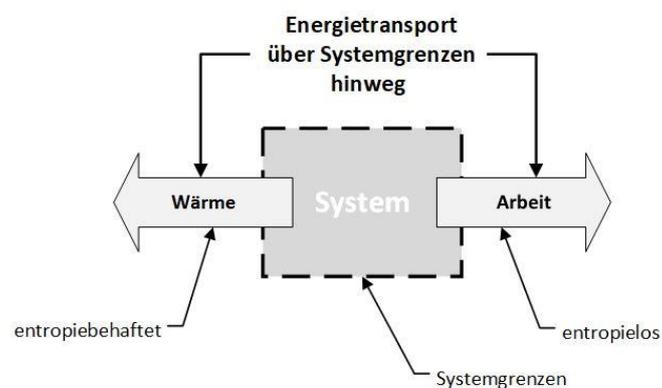


Abbildung 7: Energietransport über Systemgrenzen in Anlehnung an [28]

Aus thermodynamischer Sicht ist Wärme eine Prozessgröße, d.h. bei einer Wärmeübertragung wird dem System Energie zu- oder abgeführt. Grundlegend wird die Wärmeübertragung durch vier Arten beschrieben: [28] [29] [30]

- Wärmeleitung
- freie Konvektion
- erzwungene Konvektion
- Strahlung

Diese Übertragung von Energie erfolgt oft in Kombination der einzelnen Arten, unterliegt aber unterschiedlichen physikalischen Gesetzmäßigkeiten. [29] Für die vorliegende Arbeit ist besonders der Punkt „Strahlung“ von Bedeutung.

2.3.3 Strahlung

Die Energiezufuhr bzw. -abfuhr bei Strahlung erfolgt mittels elektromagnetischer Wellen. Dieser physikalische Effekt ist unabhängig von Materie, ist also nicht an die Bewegung von Atomen, Molekülen oder Elektronen gebunden, und kann daher auch im Vakuum erfolgen. Der Wellenlängenbereich in welchem durch elektromagnetische Wellen Energie in Form von Wärme übertragen wird liegt zwischen 0.8 und 400 μm . Mit zunehmender Temperatur des abstrahlenden Bauteils erhöht sich neben der Intensität der Strahlung auch der Anteil an für das menschliche Auge (0.35 bis 0.75 μm) sichtbarer Strahlung. Gut erkennbar ist dieses Phänomen bei einem Glühfaden einer klassischen Glühbirne. Treffen die elektromagnetischen Wellen auf einen anderen Körper so werden sie, je nach dessen spezifischen Eigenschaften, absorbiert α , reflektiert ρ oder durchgelassen τ . Bei metallischen Werkstoffen wird eine Transmission bereits ab einer Dicke von ca. 1 μm verhindert. Die Fähigkeit eines Körpers diese Strahlen auszusenden hängt von den jeweiligen Eigenschaften ab. Ein idealer Körper, ein sogenannter *Schwarzer Strahler*, ist in der Lage Strahlen mit maximaler Intensität bei bestimmten Temperaturen auszusenden. Da streng genommen alle technischen Körper keine Schwarzen Strahler sind wird der Unterschied der Strahlungsintensität eines realen technischen Körpers mit der Strahlungsintensität eines idealen Schwarzen Körpers mit dem Emissionsverhältnis ε angegeben. Bei stationären Verhältnissen ist das Emissionsverhältnis ε gleich dem Absorptionsverhältnis α und wird als Kirchhoff'sches Gesetz bezeichnet: [24] [28] [29]

$$\varepsilon = \alpha \quad (6)$$

2.3.4 Allgemeine Grundlagen der Pyrometermesstechnik

Wird ein Körper in einen energieärmeren Zustand übergeführt, so strahlt dieser Körper elektromagnetische Strahlung ab. Dieser Effekt bewirkt, dass jeder Körper dessen Temperatur über dem absoluten Nullpunkt liegt eine thermisch angeregte elektromagnetische Strahlung ausstrahlt. Im Gegensatz zu transparenten Gasen, deren Strahlung vom ganzen Volumen bestimmt und bei semitransparenten Stoffen bei denen auch tieferliegende Lagen inbegriffen

sind, ist bei intransparenten Festkörpern die Strahlung alleine von der Oberflächentemperatur abhängig. Zunächst wird dies anhand eines idealen Schwarzen Körper beschrieben, dieser besitzt unabhängig von Körper- bzw. Materialeigenschaften, die größte spektrale Strahldichte bei gegebener Wellenlänge λ und Temperatur T . Dieser Zusammenhang zwischen der abgestrahlten spektralen Strahldichte eines idealen Schwarzen Körpers und dessen Temperatur wird in Formel (7) dargestellt: [24] [29]

$$L_{\lambda,S} = \frac{1}{\pi * \Omega_0} * \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{C_2/(\lambda*T)} - 1 \right)} \quad (7)$$

$L_{\lambda,S}$ = Spektrale Strahldichte eines Schwarzen Körpers $\left[W/m^2 * \mu m * sr \right]$

Ω_0 = Raumwinkel $[sr]$

λ = Wellenlänge $[m]$

Konstanten:

$$C_1 = 3,741832 * 10^{-8} [W * m^2]$$

$$C_2 = 1,4388 * 10^{-2} [m * K]$$

Durch Multiplikation mit $\pi * \Omega_0$ erhält man das Planck'sche Strahlungsgesetzes für die spektrale spezifische Ausstrahlung $M_{\lambda,S}$ eines Schwarzen Körpers: [24]

$$M_{\lambda,S} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{C_2/(\lambda*T)} - 1 \right)} \left[W/m^2 \right] \quad (8)$$

Die Strahldichte L_S eines Schwarzen Körpers wird als Stefan-Boltzmann Gesetz bezeichnet und lässt sich durch die Integration von $L_{\lambda,S}$ über den gesamten Bereich der Wellenlänge bestimmen: [24]

$$L_S = \frac{\sigma}{\pi * \Omega_0} * T^4 \left[W/m^2 * sr \right] \quad (9)$$

Stefan – Boltzmann Konstante: $\sigma = 5,67032 * 10^{-8} [W/m^2K^4]$

Durch weitere Umformungen erhält man die spezifische Ausstrahlung M_S eines schwarzen Körpers: [24]

$$M_S = \sigma * T^4 \left[W/m^2 \right] \quad (10)$$

Wie bereits erwähnt besitzt ein idealer Schwarzer Körper die größte spektrale Strahldichte (bei gegebenem λ & T), da sich aber diese Eigenschaft eines Emissionsgrades ε von 1 nur in kleinen Wellenlängenbereichen und speziellen Hohlraumstrahlern erzielen lässt wird bei realen

technischen Körpern von sogenannten *Grauen bzw. selektiven Strahlern* gesprochen. Durch Einführung des bereits erwähnten Emissionsgrades ε , welcher von Temperatur und Wellenlängen abhängig ist, lässt sich dieser Unterschied der realen Ausstrahlung M zum idealen Schwarzen Körper mit spezifische Ausstrahlung M_S darstellen: [24]

$$M = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{(T,\lambda)} * M_{\lambda,S(T,\lambda)} * d\lambda \quad (11)$$

Die berührungslose Temperaturmessung beruht auf der Ausnutzung des Planck'schen Strahlungsgesetzes. Die Strahlungsleistung P_S , welche mittels Wärmestrahlung vom Bauteil abgegeben wird, kann mit Hilfe des Stefan-Boltzmann Gesetz berechnet werden: [27]

$$P_S = \varepsilon * \sigma * A * (T_1^4 - T_2^4) [W] \quad (12)$$

A = Oberfläche des Bauteils [m^2]

T_1 = Temperatur Bauteil [K]

T_2 = Temperatur Umgebung/Sensor [K]

Ein Strahlungsthermometer (im Weiteren auch Pyrometer genannt) nutzt diesen Effekt um einen Temperatursensor zu erwärmen. Die Strahlung wird mittels Ablenkoptik auf ein Thermoelement bzw. auf eine Thermokette (Reihenschaltung zur Erhöhung der Empfindlichkeit) gelenkt und die Temperatur der abstrahlenden Oberfläche wird optoelektronisch und berührungslos gemessen (siehe Abbildung 10) [26] [27]

Im Allgemeinen ist die Verwendung von Strahlungsthermometern durch mehrere Eigenschaften gekennzeichnet. In Tabelle 8 sind die wichtigsten Punkte angeführt.

Tabelle 8: Vor- und Nachteile von Pyrometern in Anlehnung an [27]

Berührungslose pyrometrische Temperaturmessung	
Vorteil	Nachteil
<ul style="list-style-type: none"> • Berührungslos • Verschleißfrei • keine mechanische Beanspruchung/ Beschädigung von z.B. dünnen Messobjekten • i.d.R. sehr schnelle Messung • große zusammenhängende Messbereiche • auch bewegte Messobjekte sind messbar • funktioniert auch im Vakuum 	<ul style="list-style-type: none"> • Emissionsgrad muss bei gewissen Bauarten bestimmt werden (zum Teil sehr aufwendig) • bei Metalle oft große Schwankungen des Emissionsgrades • Fehlmessungen bei Rauch/Nebel... • Winkelabhängigkeit • Einfluss Oberflächenrauigkeit

Bei der Verwendung eines Strahlungsthermometers ist auf das Wien'sche Verschiebungsgesetz zu achten. Es beschreibt den Umstand, dass die Verschiebung des Maximums der spektralen Strahldichte mit zunehmender Oberflächentemperatur der abstrahlenden Oberfläche mit kürzeren Wellenlängen einhergeht. In Abbildung 8 ist diese Verschiebung gut ersichtlich, auch ist jener Wellenbereich färbig markiert (VIS-Bereich), welcher für das menschliche Auge empfangbar ist. [24] [27]

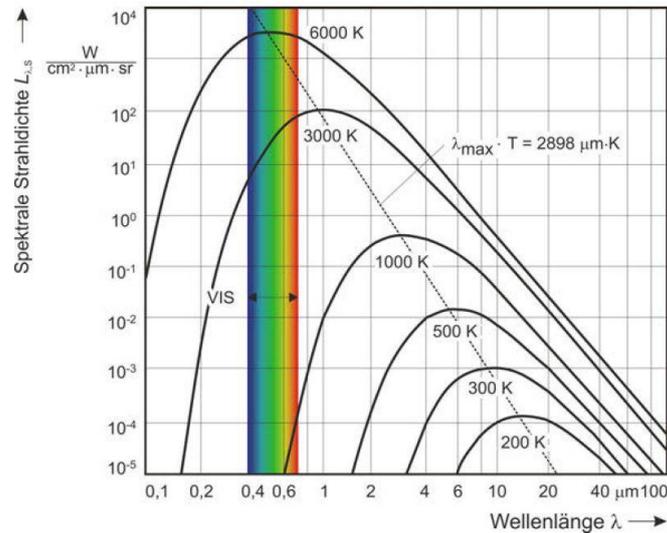


Abbildung 8: Spektrale Strahldichte eines Schwarzen Körpers als Funktion der Wellenlänge von [24]

Als das Hauptkriterium zur Einteilung von Strahlungsthermometern dient die unterschiedliche spektrale Empfindlichkeit des Sensors. Diese Empfindlichkeit wird vor allem durch die spektrale Transmissionsfähigkeit der Optik und die Fähigkeit der spektralen Empfindlichkeit des Strahlungsempfängers beschrieben. Im Allgemeinen wird zwischen Gesamtstrahlungs-, Bandstrahlungs- und spektral Strahlungsthermometern unterschieden (siehe Abbildung 9).

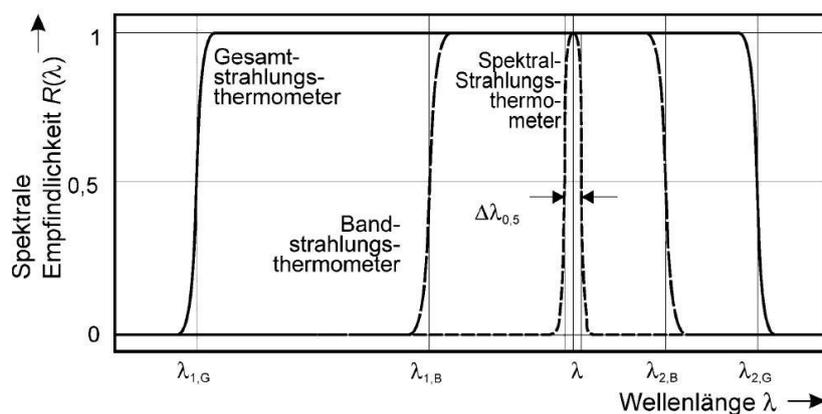


Abbildung 9: Einteilung von Strahlungsthermometern entsprechend deren Wellenlängenbereichs [24]

Gesamtstrahlungsthermometer sollten einen wirksamen Spektralbereich von mindestens 90% der gesamten vom Prüfkörper abgestrahlten Strahlung aufweisen. Die große Bandbreite dieser Bauart ermöglicht es auch extrem niedrige spektrale Strahldichten zu erfassen. Dieser Umstand ist vor allem bei Oberflächentemperaturen von unter 50°C gegeben, weshalb diese

Strahlungsthermometer gerne für niedrige Temperaturmessaufgaben verwendet werden. Diese Bauweise führt aber auch zu erheblichen Einschränkungen bzw. Problemen. Sowohl Umgebung als auch Gehäuse führen zu teils großen Störstrahlungen, die aufgrund des großen Wellenlängenmessbereiches mitgemessen werden. Auch ist eine Messung über zu große Messdistanzen nicht zielführend, da es zu einer teilweisen Absorption von bestimmten Spektralbereichen kommen kann. Insgesamt sind solche Gesamtstrahlungsthermometer aufgrund der aufwendigen Bauweise sehr teuer und nur für spezielle Temperaturbereiche zu empfehlen. Um den Einfluss von Störstrahlung zu minimieren können solche Gesamtstrahlungsthermometer mit Hilfe von optischen Filtern, Prismen, Änderung der spektralen Transmissionsfähigkeit der Optik oder der Veränderung der spektralen Empfindlichkeit des Empfängers zu sogenannten Bandstrahlungsthermometern alterniert werden. Diese Einschränkung der spektralen Bandbreite kann bis auf einen sehr kleinen Wert von ca. 0.02 bis 0.05 der Gesamtwellenlänge betrieben werden. Ab solchen Bandbreiten spricht man von spektralen Strahlungsthermometern. Bedingung für die erfolgreiche Messung ist allerdings, aufgrund der Schmäle des Wellenbandes, ein ausreichend großes/starkes Signal, sprich die Temperatur der zu messenden Oberfläche sollte nicht unter 200°C liegen. Ein entscheidender Vorteil von spektralen Strahlungsthermometern liegt vor allem bei höheren Temperaturbereichen, hier sind sehr genauen Messungen mit minimalen Messfehlern möglich. [24]

Eine hinreichend genau Bestimmung bzw. Ermittlung des Emissionsgrades ist für eine erfolgreiche Messung eine wichtige Bedingung. Aufgrund der Vielzahl an Einflussfaktoren auf den Emissionsgrad (siehe Tabelle 9) ist eine Bestimmung dieses Wertes aufgrund von Literaturquellen bzw. auf Erkenntnissen aus anderen Versuchen nur sehr bedingt umsetzbar. Diese Kennwerte unterscheiden bei verschiedenen Materialien oft zwischen Temperatur, Wellenlängenbereich, Materialzusammensetzung und Oberflächenbeschaffenheit und bieten sich daher als erster Richtwert an. Eine weitere Möglichkeit bietet die sehr aufwendige experimentelle Bestimmung mittels kalorimetrischer Verfahren, Reflexionsmethoden oder Vergleichsmethoden mit der Strahlung von Schwarzen Strahlern. [24]

Die vom kalibrierten Pyrometer detektierten Werte setzen sich aus mehreren Teilstrahlungsleistungen zusammen. Dabei ist aber nur die Eigenstrahlungsleistung des Messobjektes von Bedeutung. Strahlungsleistungen die aufgrund von Reflexion oder Transmission detektiert werden führen zu einem falschen Messergebnis und sollten so gering als möglich gehalten werden. Mathematisch wird dieser Umstand in Formel 13 ersichtlich und in Abbildung 10 ist dieser Zusammenhang graphisch dargestellt: [24] [29]

$$\Phi_{Ges} = \Phi_{Mess} * \varepsilon + \Phi_{Um} * \rho + \Phi_{Um} * \tau [W] \quad (13)$$

Φ_{Ges} = gesamte Strahlungsleistung

$\Phi_{Mess} * \varepsilon$ = Strahlungsleistung des Messobjektes mit Emissionsgrad

$\Phi_{Um} * \rho$ = Strahlungsleistung der Umgebung mit Reflexionsgrad

$\Phi_{Um} * \tau = \text{Strahlungsleistung der Umgebung mit Transmissionsgrad}$

Zusammenhang der Koeffizienten lautet: $1 = \varepsilon + \rho + \tau$

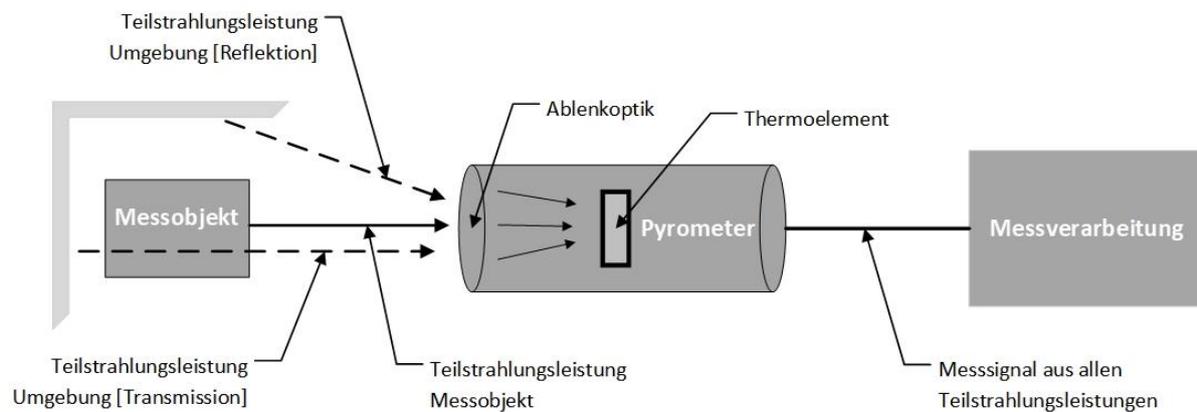


Abbildung 10: Schematische Messanordnung mit strahlender Umgebung in Anlehnung an [24] [26]

In Tabelle 9 werden abschließend einige Fehlerquellen aufgelistet, welche bei der Verwendung eines Strahlungsthermometers berücksichtigt werden müssen.

Tabelle 9: Mögliche Fehlerquellen bei Strahlungsthermometer in Anlehnung an [24]

Strahlungsthermometer	
Fehlerquelle	Anwendung
<ul style="list-style-type: none"> Messobjekt 	<ul style="list-style-type: none"> Temperaturverteilung und Emissionsverteilung auf Oberfläche nicht gleichmäßig verteilt Richtungsselektivität des Strahlers
<ul style="list-style-type: none"> Messumgebung 	<ul style="list-style-type: none"> Strahlung aus dem Volumen bzw. vom Hintergrund bei transparenten Objekten Direkte und reflektierte Fremdstrahlung mit anderer Temperatur Einfluss vom Transmissionsgrad der Übertragungsstrecke
<ul style="list-style-type: none"> Übertragungsstrecke 	<ul style="list-style-type: none"> Strahlung von Filtern, Blenden, Gehäuse-Innenseite Einfluss vom Transmissionsgrad der Optik/Filter Kennlinien- und Kalibrierungsfehler Rauschen der elektrischen Baugruppe Rauch, Nebel

2.3.5 Grundlagen zum Messen mit Thermoelementen des Typ K

Wird eine Temperaturmessung an örtlich begrenzter Stelle verlangt werden gerne Thermoelemente verwendet. Dieses Messverfahren (siehe Tabelle 7) beruht auf der Ausnutzung des sogenannten Seebeck-Effektes. Der Aufbau (Abbildung 11) besteht aus zwei miteinander verbundenen elektrischen Leitern (in weiterer Folge einfach Schenkel genannt). Sind die Verbindungsstellen unterschiedlichen Temperaturen ausgesetzt so wird in den Schenkeln eine Potentialspannung, die sogenannte Thermospannung, hervorgerufen. Diese messbare Größe ist

aber nicht direkt proportional zur gemessenen Temperatur, sondern zur Differenz der Temperatur zwischen der Messstelle und der Vergleichsstelle. Daher muss die Temperatur der Vergleichsstelle entweder konstant oder durch Messungen bekannt sein um die tatsächliche Temperatur an der Messstelle berechnen zu können. [24] [26]

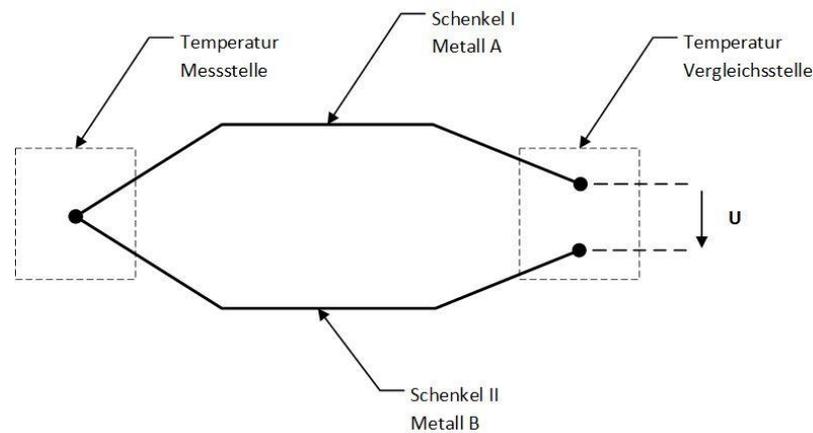


Abbildung 11: Schematischer Aufbau eines Thermoelements in Anlehnung an [24] [26]

Ein verbreiteter Vertreter von Thermoelementen ist der Typ K. Typischerweise besteht der positive Schenkel aus bis zu 90% Nickel, 9% Chrom sowie Anteilen aus Eisen, Silizium, Mangan, Kobalt und Kohlenstoff sowie der negative Schenkel aus bis zu 96% Nickel, 1.6% Silizium, 1.8% Aluminium, Mangan, Kobalt und Eisen. Aufgrund dieser Bestandteile wird der Typ K auch als Nickel-Chrom/Nickel-Aluminium-Thermoelement bezeichnet. Bei der Anwendung in oxidierender Atmosphäre ist vor allem die Oxidation der Schenkel zu berücksichtigen. Diese führt relativ rasch zu einer Abweichung der Thermospannung und somit zu einer Abweichung der Messergebnisse. Auch der Einsatz im Vakuum ist nicht unproblematisch, aufgrund der Ausdampfung von z.B. Chromanteile nimmt die Kennlinienabweichung zu. In Tabelle 10 sind die empfohlenen Maximaltemperaturen für den Typ K in Abhängigkeit des Schenkeldurchmessers angegeben. Unabhängig davon sind Typ K Elemente aber bei kurzzeitigem Betrieb in der Lage bei Temperaturen von bis zu 1350°C eingesetzt zu werden, ohne dass eine merkliche Abweichung von der Kennlinie festgestellt werden kann. [24]

Tabelle 10: Empfohlene Maximaltemperatur für Typ K in Anlehnung an [24]

Typ K – Ni-Cr/Ni-Al					
Einsatzzeit [h]	Durchmesser [mm]				
	0.65	1	1.29	2.3	3.2
10.000	750°C	800°C	900°C	1000°C	1100°C
250	850°C	900°C	1000°C	1100°C	1200°C

2.3.6 Grundlagen zu wärmeresistente Folien

Die typischen Gebrauchstemperaturen von thermoplastischen Kunststoffen liegen i.R. unter 100°C. Zwar nähern sich einige Sonderkunststoffe, wie z.B. Fluorpolymere, Silicone oder duro-

plastische Sonder-Formmassen, einer Dauergebrauchstemperatur von bis zu 200°C an, weisen aber bei diesen Temperaturbereichen unzureichende mechanische Eigenschaften auf. Vor allem die Luft- und Raumfahrt sowie die Rüstungsindustrie bemühten sich seit den frühen 60er Jahren Kunststoffe zu entwickeln, welche Eigenschaften wie z.B. Thermostabilität, Formbeständigkeit und ausreichende mechanische Festigkeit unter Temperatureinfluss aufweisen. Die Notwendigkeit der Entwicklung von verbesserten thermo-mechanischen Eigenschaften liefert das Beispiel der Oberflächentemperatur von Flugobjekten, diese beträgt bei einer Geschwindigkeit von Mach 2 bereits 150°C und bei Mach 4 bis zu 500°C. Diesen extremen Beanspruchungen standzuhalten war die Triebfeder der Entwicklung. Die bekanntesten und an der Produktionsmenge meist hergestellten hochtemperaturbeständigen Kunststoffe sind die Polyimide. Die Herstellung kann sowohl durch Polykondensation als auch durch Polyaddition erfolgen. Die Polykondensation beruht auf einem mehrstufigen Verfahren, in dem durch Reaktion eines aromatischen Diamins mit einem Dianhydrids ein schmelzbares Zwischenprodukt entsteht. Dieses Zwischenprodukt wird unter anderem durch Wärmezufuhr zu einem unlöslichen sowie nicht schmelzbaren Polyimid verwandelt. Zwar können einige Polykondensations-typen als Thermoplaste bezeichnet werden, dies bedeutet aber nicht, dass sie schmelzformbar sind, ihre Schmelztemperatur liegt nämlich einiges über der Zersetzungstemperatur. Durch den aufwendigen Verarbeitungsprozess sind die meisten Polyimide nicht als Rohstoff sondern als Halbzeug erhältlich. Typische Lieferformen sind das Pulver, Spray, Formkörper, Harze oder Folien. Die hervorragenden Eigenschaften (siehe Tabelle 11) des Polyimides beruhen auf dem inneren Aufbau, welcher sich durch aromatische oder heterocyclische Ringverbindungen mit dicht zusammengerückter fadenförmiger Makromolekülstruktur auszeichnet. Aufgrund dieses inneren Aufbaus ist ein sehr großes Anwendungsspektrum möglich. Als Formkörper werden sie als Kolbenringe, Dichtungen, Lager oder Spulenkörper eingesetzt, hier sei ihre größte Verbreitung als Dichtung für verschiedene Kompressorstufen in der Boing 747 erwähnt. Die Verwendung in Form einer Folie erfolgt als Isolierstoff für Kabelsätze, Drahtmäntel oder elektrischen Nuten oder auch an außergewöhnlichen Einsatzorten, wie z.B. mit Aluminium bedampfte Polyimidfolien welche als Schutz gegen Sonneneinstrahlung für Raumfahrzeuge herangezogen werden. [31]

Tabelle 11: Eigenschaften von Polyimiden in Anlehnung an [31]

Polyimide	
Eigenschaften	Fähigkeiten
<ul style="list-style-type: none"> • thermische 	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Thermostabilität • hohe Wärmestandsfestigkeit • hohe Flammwidrigkeit
<ul style="list-style-type: none"> • mechanische 	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Festigkeit über einen breiten Temperaturbereich (-240°C bis +370°C) • hohe Steifigkeit und Härte • günstiges Gleit- und Abriebverhalten
<ul style="list-style-type: none"> • sonstige 	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Strahlenbeständigkeit • gute elektrische Leitfähigkeit • geringes Ausgasverhalten in Vakuum • ausreichende Beständigkeit gegen Chemikalien/Wasser

3 Experimenteller Teil

In diesem Kapitel werden sämtliche Schritte, welche zur Durchführung des experimentellen Teiles dieser Arbeit notwendig sind, dargestellt. In einem ersten Schritt wird das verwendete Equipment, wie z.B. die Elektronenstrahlschweißanlage und das Pyrometer erörtert. In weiterer Folge wird auf die Entwicklung und Herstellung des Pyrometerschutzsystems eingegangen. Den Abschluss bildet die Darstellung der unterschiedlichen Versuchsaufbauten für die Emissionsgradbestimmung sowie für die Herstellung verschiedener AM Strukturen.

3.1 Equipment

Für sämtliche Versuche wurden von der Technischen Universität Graz zur Verfügung gestellten Geräte verwendet. Es werden die eingesetzten Gerätschaften im Einzelnen genauer erörtert und auf die selbst entwickelte Pyrometer-Schutzapparatur eingegangen.

3.1.1 Elektronenschweißanlage

Die Elektronenschweißanlage (Pro-Beam EBG 45-150 K14) der Technischen Universität Graz ist in der Lage Einschweißtiefen von bis zu 200mm zu erzielen. Aufgrund der Kammergröße, der maximalen Strahlleistung sowie zahlreicher Zusatzausrüstung deckt die Anlage ein großes Einsatzgebiet ab. Durch eine zusätzlich integrierte Drahtfördereinheit sowie einem beweglichen Hubarbeitstisch (in xy-Ebene und z-Achse verfahrbar) sind neben dem herkömmlichen Elektronenstrahlschweißen auch weitere Fertigungsmethoden wie Beschichten oder Additive Fertigung möglich. Die Technologie im Vakuum ermöglicht die Verarbeitung von hochreaktiven Werkstoffen, welche durch die anpassbare Strahlablenkung in mannigfaltigster Weise bearbeitet werden können. [32]

Elektronenschweißanlage (EBG 45-150 K14)	
Bild	Eigenschaften
	<ul style="list-style-type: none"> • Strahlleistung: max. 45kW • Hochspannung: max. 150kV • Strahlstrom: 0,1 – 300mA • Kammervolumen 1.4m³ • Drahtdurchmesser: 0.6 – 2mm • Drahtfördergeschwindigkeit: max. 10m/min • Kammerdruck (minimal): 5*10⁻⁵mbar

Abbildung 12: Elektronenschweißanlage Technische Universität Graz [32]

3.1.2 Werkstoff

Sämtliche Versuche erfolgten auf Substratplatten aus Ti-6Al-4V welche eine Abmessung von ~ 200x50x15mm haben. Vor Beginn jedes Versuchs wurden sämtliche Substratplatten von ihrer intrinsischen Passivschicht befreit. Als Schweißzusatz wurde ein Ø1,2mm AWS A5.16-ER Ti5 Massivdraht verwendet der in seiner chemischen Zusammensetzung der Ti6Al4V Spezifikation entspricht.

3.1.3 Pyrometer

Zur Temperaturmessung wurde ein Teilstrahlungs-pyrometer der Firma *Sensortherm* Typ *Metis M318* verwendet. Die Bestimmung des Messfleckdurchmessers sowie der Fokusslage erfolgen bei diesem Modell mit Hilfe eines Laserpilotlichtes. Die Erfassung, Weiterverarbeitung und Verarbeitung sämtlicher Messdaten erfolgte unter Verwendung der Messsoftware *Sensortools* am PC. Mit Hilfe des in der Software integrierten Interfaces lassen sich sämtliche Parameter wie Emissionsgrad, Transmissionsgrad, Messfrequenz, usw. auf die individuellen und jeweiligen Anforderungen einstellen. [33]

Teilstrahlungs-pyrometer Metis M318	
Bild	Eigenschaften
	<ul style="list-style-type: none"> • Messbereich: 150 – 1200°C • Spektralbereich: 1,65 – 2,1 µm • Messabstand: 170 – 4500mm • Messfleckgröße: 1 – 34mm • Messunsicherheit: 0,4% vom Messwert in °C + 1K (min. 2°C) • Emissionsgrad: 0,050 – 1,200¹ • Transmissionsgrad: 0,050 – 1,000

Abbildung 13: Teilstrahlungs-pyrometer M318 mit charakteristischen Eigenschaften [33]

3.1.4 Pyrometer-Schutzvorrichtung

Zum Schutz der Messoptik wurde ein Folientransportsystem sowie ein dazu passendes Gehäuse entwickelt. Wie bereits aus einer vorhergehenden Arbeit [8] an der TU Graz bekannt war kommt es speziell beim Schweißen zu teils signifikanten Metallausdampfungen des Schmelzbades und in Folge dessen zu einer Kontamination der Vakuumkammer. Diese unerwünschten Ablagerungen bilden eine mit fortlaufendem Schweißprozess immer dicker werdende Sperrschicht aus, die den Transmissionsgrad der Pyrometeroptik in einem nicht vorher-sagbaren Grad manipuliert. Das eingesetzte Pyrometer liefert im Zuge dieser sich ständige veränderten Messbedingungen i.d.R. zu niedrige Messwerte.

¹ Das Softwarepaket der Pyrometersteuerung lässt ein Überregelung des Emissionsgrades über 1 zu um möglichen Messfehlern entgegenwirken zu können.

Die Ermöglichung einer exakten, stetigen und reproduzierbaren Oberflächentemperaturmessung während des additiven Fertigungsprozesses soll mit Hilfe der entwickelten Schutzvorrichtung ermöglicht werden. Die Herausforderungen bei der Entwicklung lagen auf der einen Seite in der Besonderheit des Elektronenstrahlschweißprozesses, welcher wie bereits in Kapitel 2.2.2 beschrieben im Vakuum abläuft und auf der anderen Seite bei der begrenzten Baugröße der Vakuumkammer. Aufgrund dieser Rahmenbedingungen erforderte es eine spezielle Konstruktion mit möglichst kompakter Bauform um den begrenzten Raum innerhalb der Schweißkammer sinnvoll zu nutzen und gleichzeitig eine benutzerfreundliche Handhabung sicherzustellen. Das gesamte System sollte so ausgelegt werden, dass mit wenigen Handgriffen das Pyrometer an- bzw. abgebaut werden kann. Ein zusätzlich angebrachtes Sicherungsglas vor dem eigentlichen Objektivglas des Pyrometers dient als zusätzlicher Schutz der teuren Optik vor „Beschlag“ bzw. Beschädigung und sollte regelmäßig kontrolliert und ausgetauscht werden. Die Zugänglichkeit zur manuell bedienbaren Einstellschraube für die Messfleckgröße sollte ebenfalls jederzeit gegeben sein und der Austausch an neuem Folienmaterial soll schnell und ohne weitere Justierarbeiten von statten gehen. Die Wanddicke des Gehäuses war so wählen, dass sich die im Gehäuse verbauten Komponenten möglichst langsam erwärmen.

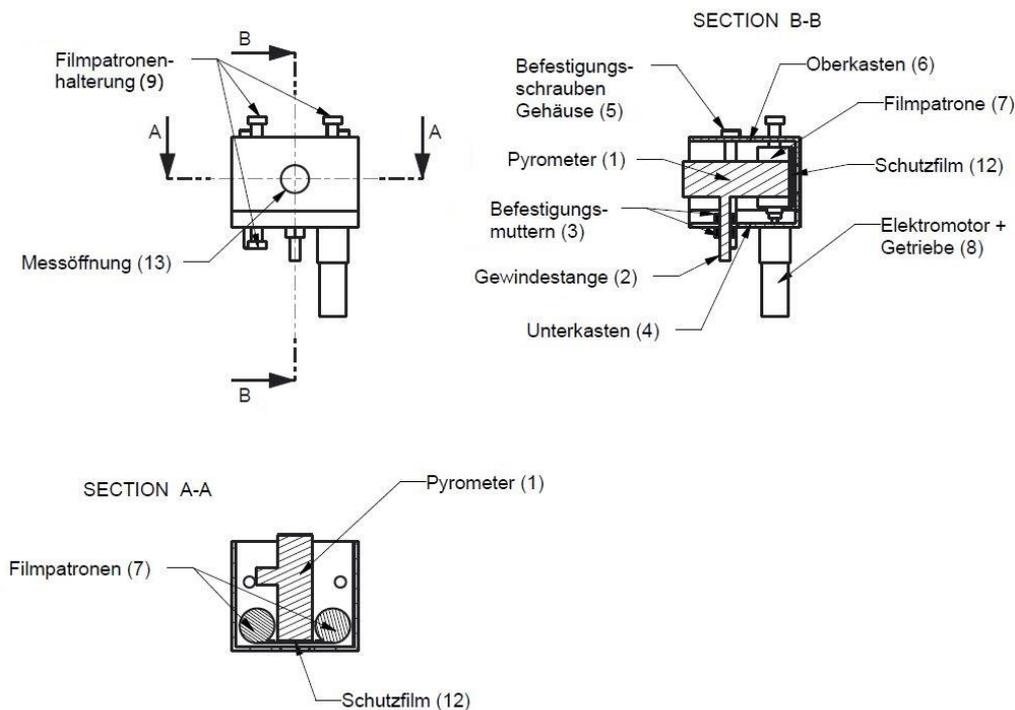


Abbildung 14: CAD Zeichnung der hergestellten Schutzvorrichtung

Das Entwickelte Konzept ist in Abbildung 14 als CAD Zeichnung und in Abbildung 16 als final realisiertes Bauteil zu sehen. Das Gehäuse wurde so gestaltet, dass die vorher beschriebenen Anforderungen alle erfüllt wurden. Das Pyrometer (1) wird mit Hilfe einer Gewindestange (2) und zwei Muttern (3) so am Unterkasten (4) des Gehäuses befestigt, dass einerseits die Höhe als auch andererseits die Tiefe des Pyrometers innerhalb der Schutzvorrichtung frei wählbar sind. Durch das Lockern einer der beiden Muttern kann das Pyrometer mühelos vollständig aus dem Gehäuse gezogen werden. Die Zugänglichkeit zur Messfleckeneinstellschraube des

Pyrometers ist durch die hinten offene Konstruktion ebenfalls gegeben. Durch Entfernen der beiden Befestigungsschrauben (5) kann der Oberkasten (6) einfach nach oben hin entfernt werden und bietet so eine schnelle und einfache Möglichkeit die beiden Filmpatronen (7) zu wechseln. Der Ober- sowie der Unterkasten verfügen beide eine in die Seitenwand gefräste Nut, welche eine genaue Positionierung der beiden Formteile zueinander ermöglicht. Die Antriebseinheit (Abbildung 15 Teil (8)) wird von innen her mit drei Senkschrauben (9) am Gehäuse befestigt. Als Übergangsteil zwischen Getriebeausgang und Filmpatrone dient eine extra aus Aluminium konstruierte und gefertigte Hülse (10). Für den schnellen und sicheren Ein- bzw. Ausbau der Schutzvorrichtung wurden sämtliche Stromkabel mit Bananensteckeranschlüssen (11) versehen.

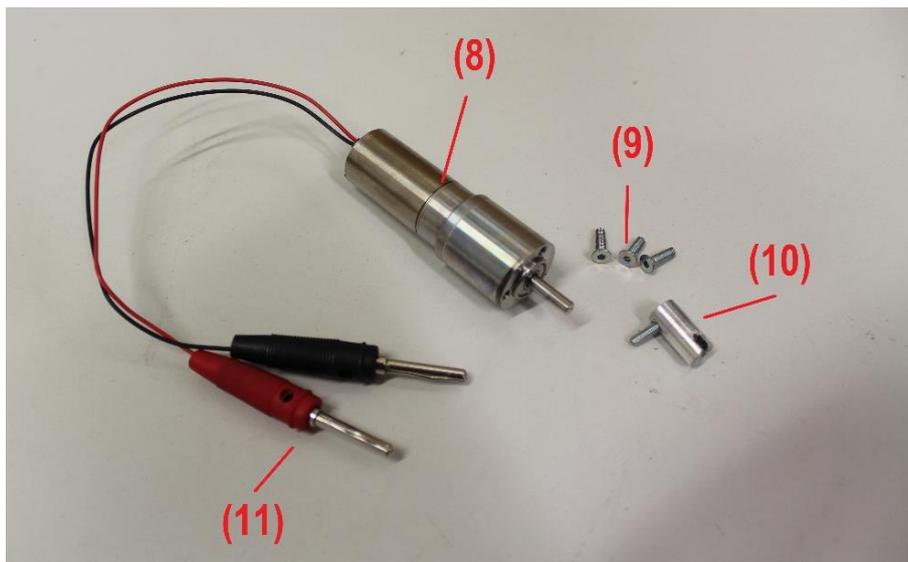


Abbildung 15: Vakuuntauglicher Gleichstrommotor DCX19SEBKL24V mit Planetenuntersetzung GPX22A (beide von der Firma „MaxonMotor“) sowie den passendem Stromversorgungssteckern und der selbst gefertigten Filmpatronenaufnahme

In Abbildung 16 ist der zugekaufte Elektromotor (1) unter einer Schutzhaut liegend, die spezielle Schutzfolie (12) hinter der Messöffnung (13), die verwendeten Filmrollenpatronen (7) sowie das selbstgefertigte Gehäuse (6) gut ersichtlich. Es wurde ein vakuuntauglicher Motor (bis 10^{-7} mbar) der Firma *MaxonMotor* des Typs *DCX19S EBKL24V* gewählt. Dieser Gleichstrommotor besitzt Bürsten aus Edelmetall, welche einen Einsatz unter den beschriebenen Bedingungen ermöglichen. Da der Motor (siehe Tabelle 12) bei Nennspannung eine Drehzahl von über 4000 min^{-1} erreicht, musste eine geeignete Untersetzung für die geforderten Eigenschaften des Folientransportsystems ausgewählt werden. Passend zur kurzen Bauform des Motors wurde ein dreistufiges Planetengetriebe mit geeignetem Wellenausgang gewählt. Das Getriebe *GPX22A* mit einer Untersetzung von 138:1 ermöglicht einen geeigneten variablen Drehzahlbereich von 0 bis ca. 45 min^{-1} am Wellenausgang und passt somit in die selbst gesetzten Spezifikationen. Die Drehzahl dieses Getriebemotors kann über die Spannungsversorgung relativ einfach und rasch an die jeweiligen Betriebsbedingungen angepasst werden (siehe Tabelle 13). Trotz dieser Kombination aus Getriebe und Motor wurde eine sehr kleine Bauteildimension erzielt. Die Gesamtlänge des Getriebemotors beträgt 79mm bei einem maximalen Durchmesser von 22mm.

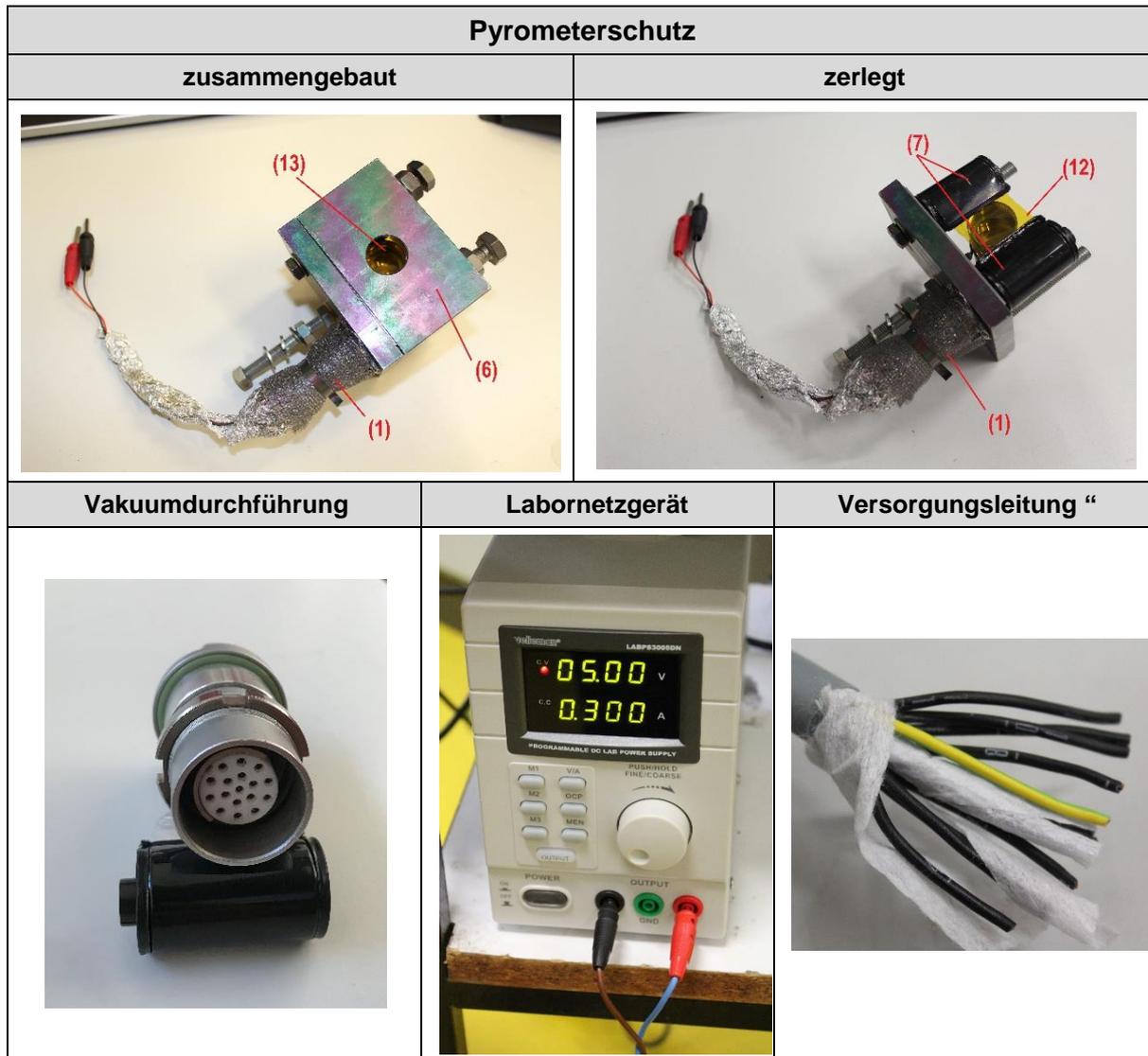


Abbildung 16: Pyrometerschutz und wichtige Bauteile

Die Stromversorgung wurde mit Hilfe eines Labornetzgerätes vom Typ *Velleman LABPS3005DN* bewerkstelligt (siehe Abbildung 16). Dieses Gerät arbeitet mit einer Eingangsspannung von 220V und 50Hz. Die Ausgangsspannung ist Gleichstrom mit einem Regelbereich von 0 – 30V und einer Auflösung von 1mV. Der Ausgangsstrom kann zwischen 0 – 5A mit einer Auflösung von 1mA geregelt werden. Über drei Memory-Tasten lassen sich zudem voreingestellte Programme einfach und schnell aufrufen. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, dieses Gerät über einen USB- bzw. RS232-Port von einem PC aus anzusteuern. [34] Für die Versorgung der Antriebseinheit im Inneren der Vakuumkammer wurden außerdem neue Versorgungsleitungen und Adapterstecker (siehe Abbildung 16) in der Anlage verbaut.

Tabelle 12: Kennwerte vom Getriebemotor laut [35]

Antriebskonfiguration			
Kenndaten GPX22 A 138:1	Werte	Kenndaten DCX 19S KL 24V	Werte
Untersetzung	138:1	Kommutierung	Edelmetallbürsten
Untersetzung absolut	341550/2470	Nennspannung	24 V
Stufenzahl	3	Nenndrehzahl	4480 min ⁻¹
max. Dauerdrehmoment	1.2 Nm	Nenndrehmoment	11 mNm
kurzfristiges zulässiges Drehmoment	1.5 Nm	Nennstrom	0.319 A
max. übertragbare Leistung dauernd	6 W	Drehzahlkonstante	268 min ⁻¹ V ⁻¹
max. übertragbare Leistung kurzfristig	7.5 W	Drehmomentkonstante	35.8 mNm A ⁻¹
empfohlener Temperatur- bereich	-40° bis +100°C	max. Wicklungstemperatur	100°C

Tabelle 13: Umrechnung von Volt in Umdrehungen pro Minute für den Getriebemotor mit dem verwendeten Drehzahlbereich

Umrechnung Volt in Drehzahl					
Volt	min ⁻¹	Volt	min ⁻¹	Volt	min ⁻¹
1	1.94	9	17.48	17	33.01
2	3.88	10	19.42	18	34.96
3	5.83	11	21.36	19	36.89
4	7.77	12	23.30	20	38.84
5	9.71	13	25.25	21	40.78
6	11.65	14	27.18	22	42.72
7	13.59	15	29.13	23	44.67
8	15.54	16	31.07	24	46.61

Zum Schutz der Messoptik des Teilstrahlungs-pyrometers wurde eine Polyimid-Folie der Firma *Kapton* verwendet. Der Typ *Kapton HN* zeichnet sich durch seine Zuverlässigkeit in extremen Bedingungen aus. So bieten der flexible Aufbau sowie die ausgezeichneten physikalischen, mechanischen und elektrischen Eigenschaften die Grundlage für eine Vielzahl an technischen Anwendungen. In Tabelle 14 sind die wichtigsten Eigenschaften dieses Typs *Kapton HN* aufgelistet. [36] Diese speziellen Eigenschaften (hohe thermische Beständigkeit und ausgezeichnete mechanische Eigenschaften) sind von besonderer Bedeutung bei der ausgewählten Anwendungsart. Die Folie (Lieferform 35x20.000mm) wurde zugeschnitten (35x2000mm) um diese anschließend in Filmrollen aufwickeln zu können. Diese Filmrollen wurden in weiterer Folge im Gehäuse vom Motor in angepasster Geschwindigkeit abgerollt und schützen so die Messoptik des Pyrometers vor „Beschlag“ mit Metaldampf und ermöglichen durch ihre kontinuierliche Bewegung eine stabile und ungestörte Messung. Während dieses Vorgangs ist die

Folie einer hohen Strahlungsenergie in Form von Wärme und einer mechanischen Zugbeanspruchung durch die Abrollbewegung ausgesetzt.

Tabelle 14: Eigenschaften von Kapton HN in Abhängigkeit der Fertigungsdicke mit der verwendeten Konfiguration von 25µm laut [36]

Kapton HN				
Eigenschaften	Dicke			
	25µm	50µm	75µm	125µm
Dichte [g/cm ³]	1.42	1.42	1.42	1.42
Zugfestigkeit längs [N/mm ²]	231	231	231	231
Dehnung längs [%]	72	82	82	82
Schrumpfung bei 150°C [%]	0.17	0.17	0.17	0.17
Durchschlagfestigkeit [kV/mm]	303	240	201	154
Dielektrizitätskonstante 1Khz	3.4	3.4	3.5	3.5

Das selbstgebaute Gehäuse aus dem Zusatzwerkstoff X 90 – IG wurde mit Hilfe eines drahtbasierten additiven CMT-Fertigungsprozesses hergestellt. Die Wandstärke beträgt ca. 5mm und wurde im schichtweisen Aufbauverfahren erzeugt und an den notwendigen Stellen konventionell nachbearbeitet. Die primäre Aufgabe besteht im Schutz der Antriebs- und Schutzfilmtechnik vor der Strahlungswärme des Schweißprozesses. Die verwendeten Komponenten (wie z.B. Pyrometer und Antriebsstrang) besitzen lt. Hersteller eine relativ niedrige empfohlene Betriebstemperatur, weshalb ein Schutz vor Strahlungsenergie unbedingt erforderlich ist. Eine weitere wichtige Eigenschaft besteht in der einfachen Positionierung der gesamten Messtechnik. Alle für eine Messung erforderlichen Gerätschaften sind in einem kleinen kompakten Gehäuse zusammengefasst, welches mit Hilfe eines variablen Positionierarms leicht an jeder beliebigen Stelle innerhalb der Schweißkammer positioniert werden kann. Der Knickarm wurde zusätzlich noch mit einer Gewindeschraube erweitert, dies ermöglicht eine Befestigung an der Drahtfördereinheit. Da die Drahtfördereinheit in alle drei Achsen verfahrbar ist kann auch das daran befestigte Pyrometer an jeden beliebigen Ort innerhalb der Schweißkammer positioniert werden.

Im Zuge der ersten Erprobungen wurden einige wichtige Grenzen und Aussagen zur Funktionsweise der Schutzvorrichtung gesammelt. In Abbildung 17 sind jene drei häufigsten Betriebszustände dargestellt, die durch den Zusammenhang zwischen aufgenommenem Strom und dem abgegebenen Drehmoment beschrieben werden können. Fall A beschreibt den Zustand einer abgerissenen Folie, in diesem Zustand läuft der Motor im Leerlauf und nimmt relativ wenig Strom auf. Die Messanzeige der Ampereskala fällt i.d.R. auf unter 10mA. Der nächste dargestellte Fall beschreibt den Zustand eines normalen Aufwickelverhaltens. Der Motor nimmt bei 5V Nennspannung i.d.R. um die 25mA auf. Die Stromstärke hängt stark von der vorherrschenden Wickelsituation innerhalb der Filmpatrone ab (Werte von bis zu 75mA sind je nach Voltanzahl und Wickelstatus vertretbar). Bei ungenauer Justierung der Filmpatronenausrichtung zueinander bzw. starker Reibung der Folie an der Patroneninnenseite kommt es zu einem unsauberen Aufrollen der Folie und in weiterer Folge zu einem Folienstau. Dieser

Zustand verschlechtert sich solange bis es zum Abreißen der Folie oder zum Stillstand der Drehbewegung kommt, dieser Zustand wird in Fall C dargestellt. Während mehrere Versuchsreihen wurde i.d.R. ein starker Anstieg der Stromstärke bis knapp unter 200mA beobachtet und dann ein plötzlicher Abfall auf Leerlaufleistung. Die Antriebseinheit mit ihrer relativ großen Untersetzung entwickelt in diesem Fall eine so hohe Zugkraft die in den meisten Fällen zum Abreißen der Folie führt.

Fall A „Leerlauf/Folienriss“		Fall B „Regelbetrieb“		Fall C „Überbelastung/Stillstand“	
Spannung	5V	Spannung	5V	Spannung	5V
Strom	0.008A	Strom	0.024A	Strom	0.228A
					

Abbildung 17: Schematische Darstellung von charakteristischen Strom-/Spannungszuständen der Antriebseinheit

3.2 Versuchsaufbauten

In diesem Kapitel werden die einzelnen Versuchsaufbauten genau beschrieben. Der erste Schritt besteht in der Bestimmung des Emissionsgrades, dieser ist für sämtliche weiterführende Versuche von essentieller Bedeutung. In weiterer Folge werden der experimentelle Aufbau für die additiven Strukturaufbauten zur Herstellung von charakteristischen AM Strukturen (einfache Wände, doppelte Wände und Blöcke) beschrieben.

3.2.1 Emissionsgrad

Die Versuchsaufbauten zur Emissionsgradbestimmung (siehe Abbildung 18 und Abbildung 19) bestanden jeweils aus einer Ti6Al4V Substratplatte (~200x50x15mm) als Messobjekt (1) mit drei radial ausgerichteten punktverschweißten Thermoelementen Typ-K (\varnothing 0.2mm) (2). Das Pyrometer befand sich im Schutzgehäuse (3) und das Laserpilotlicht wurde auf die gleiche Messstelle ausgerichtet auf die auch die Thermoelemente ausgerichtet wurden.

Setup A wurde mit einem Abstand von 280mm und einem Winkel von ca. 38° zwischen Außenkante Gehäuse und Oberfläche Substratplatte durchgeführt. Die am Pyrometer einstellbare Größe des Messflecks wurde mit einem Durchmesser von ca. 1.9mm gemessen und den gesamten Versuch über nicht verändert. Es wurde diese Position an der Drahtfördereinheit identifiziert, da sie eine Vielzahl an Messvarianten ermöglicht. Mit Hilfe eines kleinen adaptierten Befestigungsarms war es möglich das Schutzgehäuse so zu befestigen, dass die Lage des Messflecks frei im Raum wählbar wurde. Hierzu muss aber angemerkt werden, dass eine horizontale Bewegung in alle Richtung möglich ist, aber eine vertikale Verschiebung sich

(meist) negativ auf die Größe des Messflecks auswirkt. Der Grund liegt in der Fokussierung auf eine Abstandsebene zwischen Pyrometer und Messobjekt. Die Bestimmung der Fokussierung (Größe des Messflecks) erfolgt vor jedem Versuch manuell am Pyrometer selbst und kann während des Versuchs im Vakuum nicht nachjustiert werden. Zur Absicherung der durch den ersten Versuchsaufbau gewonnenen Erkenntnisse wurde eine zweite Versuchsreihe durchgeführt.

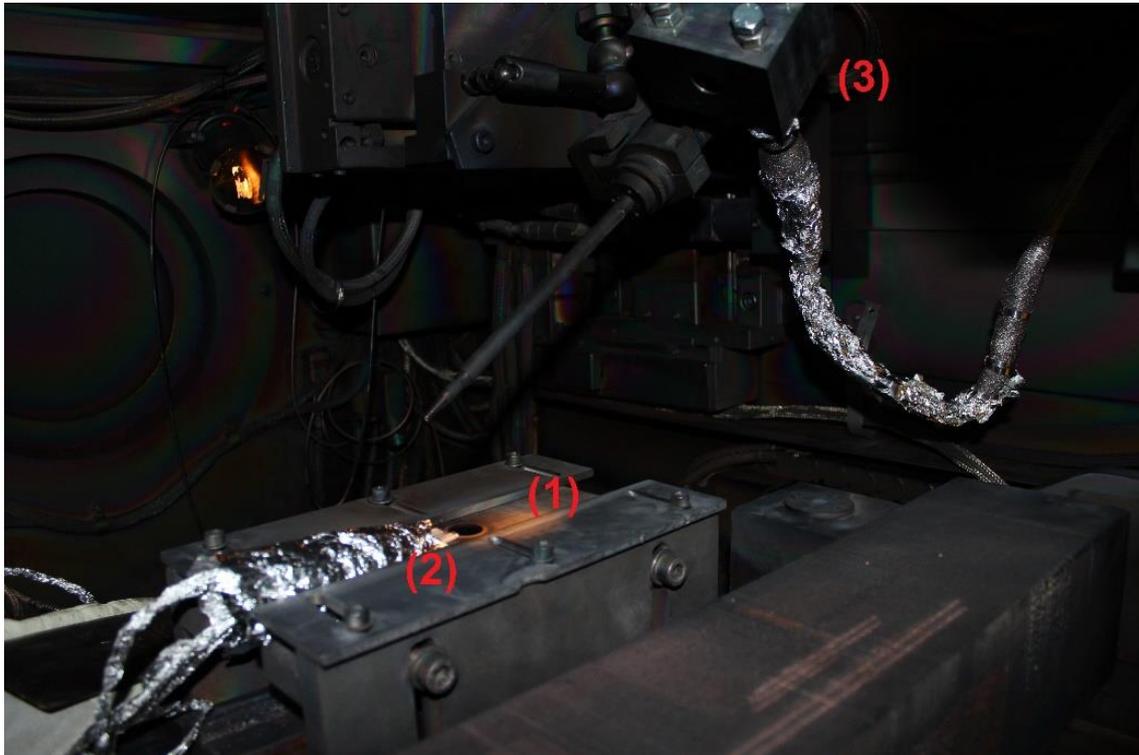


Abbildung 18: Setup A zur Bestimmung des Emissionsgrades von Ti-6Al-4V (Abstand 280mm und einem Winkel von ca. 38°)

Setup B stellte eine stillstehende Variation an der gegenüberliegenden Kammerseite mit Hilfe eines größeren Befestigungsarms dar. Der Abstand zwischen Außenkante Gehäuse und Oberfläche Substratplatte war aufgrund der beschränkenden Bauart der Kammer nicht größer als 250mm wählbar. Der Winkel wurde mit 45° festgelegt und der Messfleck mit einem Durchmesser von 2.1mm gemessen. Bei dieser Versuchsanordnung ist besonders auf die großflächig im Kammerinneren freiliegenden Messleitungen zu achten. Aufgrund der ungünstigen weiten Drahtführung besteht bei jeder Bewegung des Maschinenbettes die Gefahr einer Beschädigung/Zerquetschung von Mess- bzw. Lichtbogenleiters, was unbedingt vermieden werden musste.

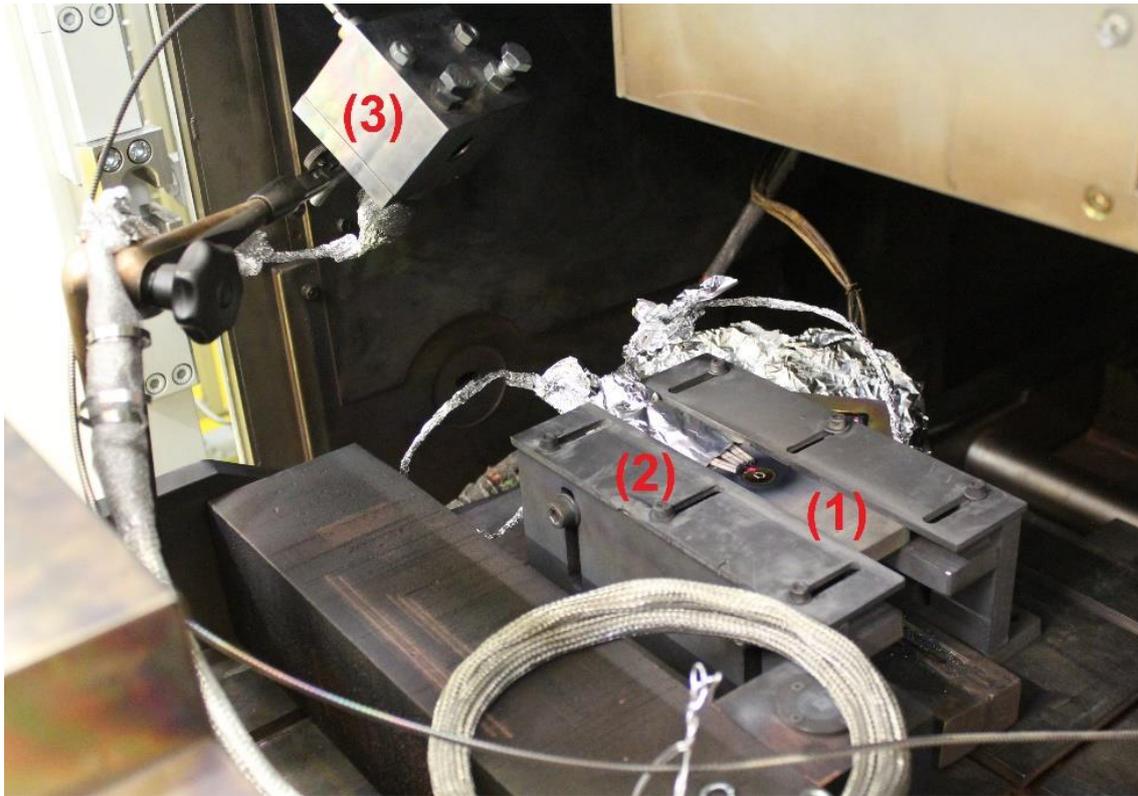


Abbildung 19: Setup B zur Bestimmung des Emissionsgrades von Ti-6Al-4V (Abstand 250mm und einem Winkel von ca. 45°)

Das Ziel dieser Versuche war es eine möglichst genaue Übereinstimmung von Thermoelement- und Pyrometermessergebnis bei ca. 1000°C Oberflächentemperatur herzustellen. Dabei galt es die folgenden Punkte zu berücksichtigen:

- Eine Ausrichtung des Messflecks des Pyrometers auf die Schweißperle der punktgeschweißten Thermoelemente, um eine möglichst exakte Positionierung zueinander sicherzustellen, war nicht zielführend. Sowohl die Schweißperle als auch die Drähte (Schenkel) der Thermoelemente beeinflussten durch ihr Volumen die lokale Wärmeleitung der Messung, weshalb eine Ausrichtung des Pyrometermessflecks in direkter Nähe zum Messpunkt des Thermoelementes bevorzugt wurde.
- Bei der Positionierung in direkter Nähe zum Messpunkt des Thermoelementes war natürlich ein gewisser Offset zwischen den Messpunkten von Thermoelement und Pyrometer hinzunehmen. Je nach Güte dieser Positionierung kam es zu einem größeren bzw. kleineren Temperaturgradienten zwischen den Messpunkten.
- Die vom Pyrometer gelieferten Temperaturwerte sind über die gesamte Größe des Messflecks gemittelt und daher war die Größe dieses Messflecks so weit als technisch möglich an die Größe und Position der Thermoelemente anzupassen.

Ein weiterer Einflussfaktor stellte der Transmissionsgrad der Messstrecke, der beweglichen Schutzfolie, sowie der zur Sicherheit weiterverwendeten Schutzglasscheibe dar. Während der Transmissionsgrad der Messstrecke bzw. der Schutzglasscheibe eine untergeordnete Rolle einnimmt, ist der Einfluss der Abrollgeschwindigkeit der Schutzfolie auf den Transmissions-

grad maßgebend. Durch Variation der Spulgeschwindigkeit wird der Grad der Dicke der Sperrschicht aus Metaldampf beeinflusst. Je dicker diese Sperrschicht desto weniger Strahlung kann vom Pyrometer detektiert werden und die ermittelten Temperaturwerte werden zunehmend unterschätzt.

Die Werkstückoberfläche bzw. -beschaffenheit hat ebenfalls einen großen Einfluss. Die von Titanlegierungen an der Atmosphäre ausgebildete Oxidschicht besitzt einen anderen Emissionsfaktor als das blanke Material und muss bei einer Messanwendung berücksichtigt werden. Im Zuge der durchgeführten Experimente wurde stets unmittelbar vor Versuchsbeginn die Oxidschicht mechanisch entfernt (d.h. das Bauteil wurde außerhalb der Vakuumkammer gereinigt und anschließend sofort in die vorbereitete Werkstückaufnahme positioniert und die Kammer anschließend evakuiert) um eine Nachbildung der Passivschicht soweit wie möglich zu verhindern.

Um eine erfolgreiche Emissionsgradbestimmung durchführen zu können wurden für diese Arbeit die folgenden Punkte sowie Lösungsansätze definiert:

- Einen möglichst geringen Temperaturgradienten zwischen den Messpunkten von Thermoelementen und Pyrometermessfleck
→ genaue Positionierung des Pyrometers sowie geeignete Strahlfigur (konzentrisch und defokussiert) zum Erhitzen
- möglichst ähnliche Messverhältnisse der verwendeten Messverfahren
→ angepasste Messfleckgröße des Pyrometers
- möglichst geringe Dicke der Sperrschicht
→ geeignete Abspulgeschwindigkeit der Schutzfolie
- Oberflächenbeschaffenheit an Verfahren anpassen
→ mechanisches entfernen der Oxidschicht unmittelbar vor Messbeginn mit Hilfe einer Messingdrahtbürste) und Propan-2-ol [(CH₃)₂CHOH] als Reinigungsmittel

Die Auswahl eines geeigneten Aufheizvorgangs erfolgte auf Basis von vorhergehenden Studienarbeiten an der Technischen Universität Graz. (siehe [6] [7]) Es wurde eine Strahlfigur aus konzentrischen Kreisen mit insgesamt 10.000 Punkten ausgewählt. Durch die spezielle Anordnung wurde einerseits ein Durchschmelzen der Substratplatte verhindert (weil immer auf den selben Punkt geheizt wird) und andererseits ließ sich durch den rotationssymmetrischen Aufbau die Wärmeverteilung leichter parametrisieren. In Abbildung 20 sind der Aufbau der Strahlfigur, die verwendeten Parameter sowie die Positionierung der Messelemente gut ersichtlich. Der Pyrometermessfleck wurde zwischen den Thermoelementen K1 und K3 platziert. Das Thermoelement K2 diente als zusätzliche Sicherheit und als Backup, für den Fall, dass eines der anderen Elemente ausfallen sollte. Um ein möglichst konstantes stationäres Temperaturfeld von 1000°C zu erreichen wurde mit 8mA Strahlleistung ca. 240 Sekunden lang die

Platte konstant aufgeheizt. Diese Temperatur wurde unter anderem deshalb ausgewählt, weil sich damit ein Großteil der vom Pyrometer detektierbaren Temperatur abbilden lässt.

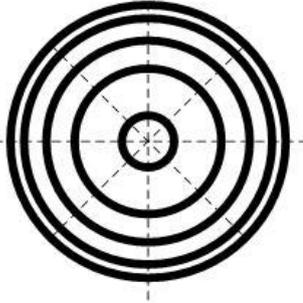
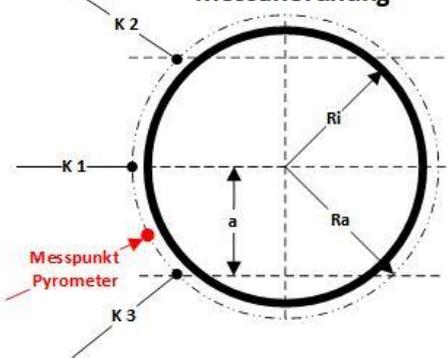
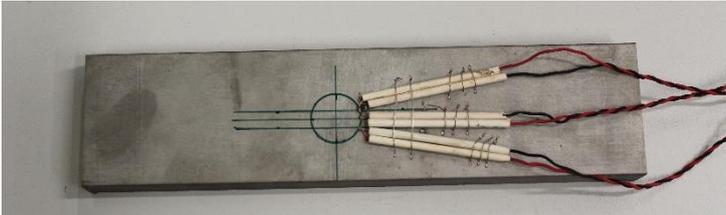
Testzyklus Emissionsgrad	
Bild	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Strahlfigur</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Messanordnung</p>  </div> </div>
Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> • Strahlstrom: 8 mA • Hochspannung: 90 kV • Strahlfigur: konzentrische Kreise • Frequenz: 2 kHz • Fokusslage: Oberfläche + 100 mA Linsenstrom • Zeitdauer: i.d.R. 4 min heizen • Radius innen $R_i = 8$ mm • Radius außen $R_a = 9$ mm • Abstand $a = 3$ mm
Substratplatte + Thermoelemente	

Abbildung 20: Prozessdesign Ermittlung Emissionsgrad sowie Substratplatte mit Thermoelementen

Für eine erste Abschätzung des Emissionsgrades wurden mehrere Literaturquellen herangezogen (siehe Tabelle 15). Diese unterschiedlichen Werte bewegen sich zum größten Teil um den Faktor 0.3 bis 0.5 im polierten Zustand, weshalb für den ersten Versuch ein Emissionsgrad von 0.35 gewählt wurde. Wie aus der Tabelle ersichtlich ist nehmen die verschiedenen Quellen auf unterschiedliche Eigenschaften und Einschränkungen sowie auf unterschiedliche Legierungstypen Rücksicht. So behandeln manche die verschiedenen Temperaturbereiche und andere berücksichtigen die Wellenlänge bei der Emissionsgradbestimmung, weshalb eine exakte Bestimmung über Literaturquellen nicht zielführend ist.

Tabelle 15: Emissionsgrad lt. Literatur für Titan und Titanlegierungen in Abhängigkeit von Wellenlänge bzw. Oberflächenqualität laut [37]–[42]

Emissionsgrad		
Werkstoff und Einstellung	Zahlenwert	Quelle
Titan Alloy C110M poliert [149°C bis 649°C]	0.08 - 0.19	[37]
Titan Alloy C110M oxidiert ab 538°C	0.51 - 0.61	
Alloy Ti-95A oxidiert ab 538°C [93°C bis 427°C]	0.35 - 0.48	[38]
Titanium poliert [1.6µm]	0.3 - 0.5	[39]
Titanium oxidiert [1.6µm]	0.6 - 0.8	
Titanium poliert [1.6µm]	0.3 - 0.5	[40]
Titanium oxidiert [1.6µm]	0.6 - 0.8	
Titanium poliert [1.6µm]	0.3 - 0.5	[41]
Titanium oxidiert [1.6µm]	0.6 - 0.8	
Alloy Ti-95A oxidiert ab 538°C [93°C bis 427°C]	0.35 - 0.48	[42]

3.2.2 Additiver Strukturaufbau

Nach erfolgreicher Bestimmung des Emissionsgrades wurden schweißtechnische Versuche unternommen. So wurden mit Hilfe von Ergebnissen aus vorhergehenden Arbeiten die aufgelisteten Parameter ausgesucht und verwendet. [7]

Tabelle 16: Gewählte Parameter für die Versuchsdurchführung

Grundeinstellung Schweißversuche	
Parameter	Werte
Beschleunigungsspannung U_B	90 kV
Strahlstrom I_s	17.5 mA
Schweißgeschwindigkeit v_s	9 mm/s
Drahtvorschub v_D	3.3 m/min
Strahlfigur	konzentrische Kreise
Strahlfigurdurchmesser	4 mm
Strahlablenkfrequenz	100 kHz
Abstand Drahtspitze zu Substratplatte (bzw. Lage)	2 mm
Abstand Drahtdüse zu Substratplatte (bzw. Lage)	8 mm
Offset zwischen den einzelnen Lagen (Höhe)	1.7 mm
Offset zwischen den einzelnen Lagen (Breite)	4 mm
Winkel der Drahtzuführung	35 Grad

So bestimmen die Beschleunigungsspannung U_B (als Maß für die Eindringtiefe) und der Strahlstrom I_s die eingebrachte Leistung in das Bauteil. Sowohl die Ablenkung des Elektronenstrahls (Strahlfigur) als auch die Strahlablenkfrequenz mussten so eingestellt werden, dass eine möglichst gleichmäßige Wärmeeinbringung sichergestellt wurde. [43] Weitere Parameter sind die

Schweißgeschwindigkeit v_S , der Drahtvorschub v_D sowie diverse Abstände (z.B. Abstand Drahtspitze zu Substratplatte, etc.) und Positionierungen, welche für einen erfolgreichen Aufbau angepasst werden mussten. Alle Versuche wurden mit gleichem Parametersatz (siehe Tabelle 16) durchgeführt.

Der mehrlagige Aufbau erfordert die exakte Kenntnis der vorhergehenden Lagenhöhe um den Maschinentisch in vertikaler Höhe entsprechend anpassen zu können. Eine Adaptierung der Drahtdüse in z-Richtung ist nicht zielführend, da die Fokussierung des Elektronenstrahls auf die gewählte Arbeitshöhe und Position zu der Drahtdüse eingestellt wurde.

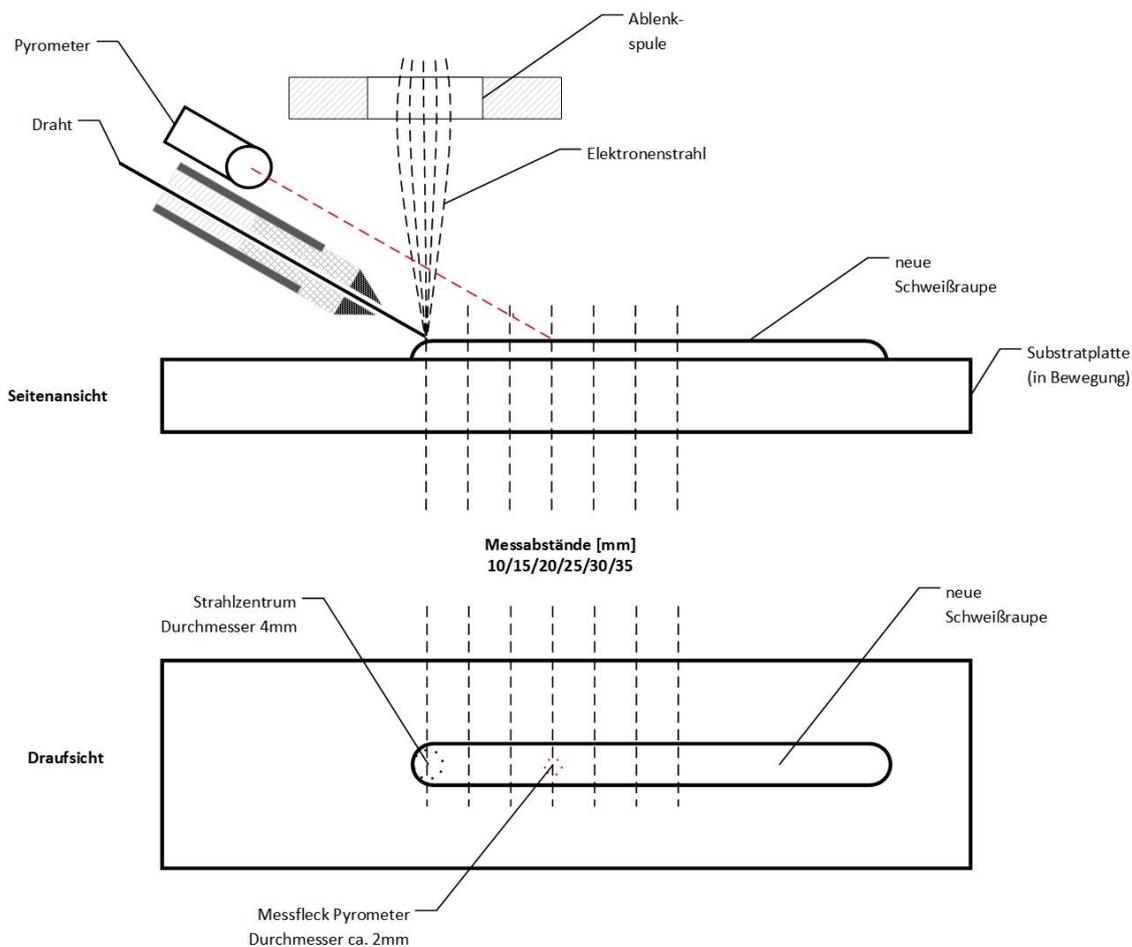


Abbildung 21: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaues Wände und Blöcke für einen fixen Abstand zum Strahlzentrum

Ziel der schweißtechnischen Versuche war es eine bessere Kenntnis über Temperaturentwicklungen und Abkühlverhalten der additiv hergestellten Strukturen zu gewinnen. Zu diesem Zweck wurden in Bezug auf die Schweißstelle die Temperaturentwicklungen von mehreren unterschiedlich weit entfernten Punkten gemessen und aufgezeichnet (siehe Abbildung 21). Die Einstellung des Abstandes erfolgte manuell und mit Hilfe des roten Laserpilotlichtes des Pyrometers und einer Schiebelehre (siehe Abbildung 22).



Abbildung 22: Bestimmung der Messabstände beim Mehrlagenaufbau

In den nachfolgenden Abbildung 23 und Abbildung 25 sind die verwendeten Aufbauarten dargestellt.



Abbildung 23: Versuchsaufbau 1 für Wände und Blöcke (Abstand 280mm und einem Winkel von ca. 50°)

Ziel dieser Versuchsreihe war die Bestimmung der Spitzentemperatur für unterschiedliche Abstände und Lagenhöhen. Da es sich um einen quasistationären Prozess handelt weist die gemessene Temperatur in den jeweiligen Messdistanzen eine quasistationäre Temperatur auf und mit diesen ermittelten Temperaturwerten lassen sich in weiterer Folge Isothermen rekonstruieren. Außerdem wurde untersucht wie sich die Temperaturentwicklung durch die Erhöhung der Schweißnahtanzahl verändert. Zu diesem Zweck wurde nach folgendem (siehe Abbildung 24) Aufbauschema 70mm bzw. 50mm lange Schweißraupen erzeugt.

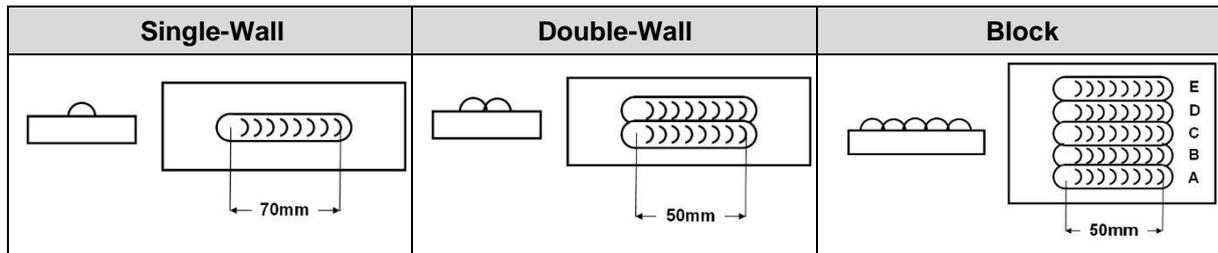


Abbildung 24: Aufbauschema zu Versuchsaufbau Wände und Blöcke

Aufgrund der begrenzten Anzahl an verfügbaren Substratplatten wurde nicht jede Schweißnahtfolge auf eine neue Platte gesetzt. Es wurden mehrere Versuchsreihen auf einem gemeinsamen Grundwerkstoff durchgeführt wobei darauf geachtet wurde, dass keine vorher durchgeführte Schweißung die nachfolgenden Messung beeinflusste. Zu diesem Zweck wurde die Kammer nach jeder Schweißlage geöffnet und geflutet um das AM-Bauteil auf Raumtemperatur abkühlen zu lassen. Der Versuchsablauf gestaltete sich dann nachfolgendem Schema:

- Single-Wall:
 1. Substratplatte vorbereiten (reinigen und in der Halterung am Maschinenbett befestigen)
 2. Pyrometer ausrichten und Kammer evakuieren
 3. Erste einzeilige Lage in der Länge von 70mm schweißen und derweil Messung mit eingeschaltetem Folienvorschub und gewähltem Emissionsgrad durchführen
 4. Nach ausreichendem Abkühlen innerhalb des Vakuums die Kammertür öffnen und Bauteil auf ca. Handwärme weiter abkühlen lassen
 5. Pyrometer neu ausrichten und evakuieren
 6. Zweite einzeilige Lage schweißen
 7. Dieser Vorgang wurde wiederholt bis die Abstände zwischen Drahtspitze und Messfleck von 10, 15, 20, 25, 30 und 35mm gemessen worden sind
 8. Substratplatte um den gewählten Offset absenken und die Schweißung & Messung erneut durchführen
 9. Vorgang wiederholen bis vier Lagen übereinander entstehen

- Double-Wall:
 - gleiches Schemata wie beim Single-Wall Verfahren nur mit zweizeiligen Lagenaufbau und einer Länge von 50mm. Zwischen der Herstellung der einzelnen Schweißraupen wird die Kammer nicht geöffnet.

- Block:
 - ebenfalls gleiches Vorgehen wie beim „Double-Wall“ Verfahren nur wurden fünf Raupen direkt nebeneinander geschweißt und die Schweißabfolge nach folgendem Schema variiert um einen ungleichen Lagenaufbau zu verhindern:
 - Lage 1: A → B → C → D → E
 - Lage 2: C → D → E → B → A
 - Lage 3: C → B → A → D → E
 - Lage 4: C → D → E → B → A

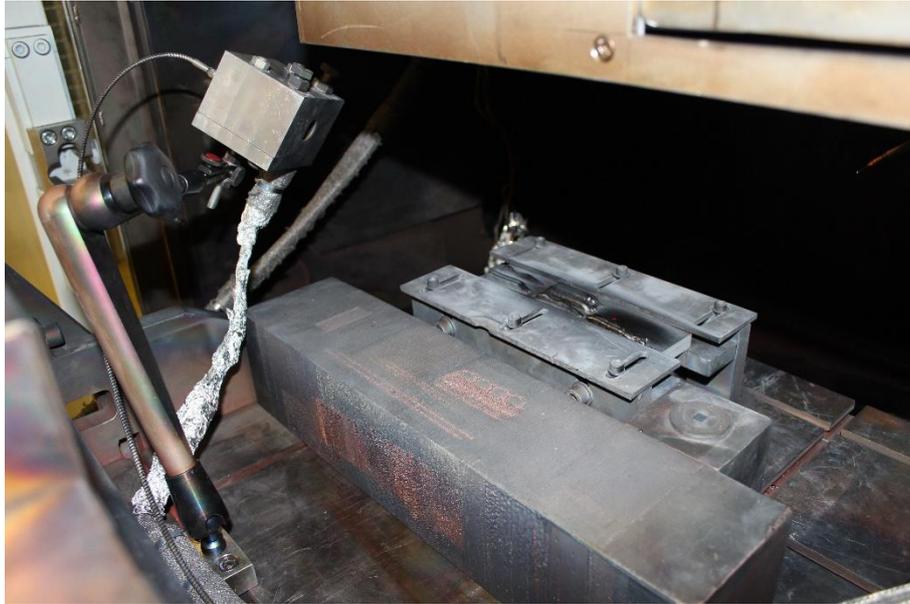


Abbildung 25: Versuchsaufbau 2 für Wände und Blöcke (Abstand 280mm mit einem Winkel von ca.35°)

Der Versuchsaufbau 2 für Wände und Blöcke (siehe Abbildung 25 und Abbildung 26) wurde mit einem Abstand von 280mm und einem Winkel von ca. 35° zwischen Außenkante Gehäuse und Oberfläche Substratplatte durchgeführt. Die am Pyrometer einstellbare Größe des Messflecks wurde mit einem Durchmesser von 2.1mm gemessen und den gesamten Versuch über nicht verändert. Ziel dieser zweiten Versuchsreihe für den additiven Strukturaufbau war die Bestimmung von Abkühlraten (mit Hilfe der Betrachtung der $t_{8/5}$ Zeiten) von unterschiedlichen Aufbautypen und verschiedenen Abkühlverfahren. Es wurde die bisher am Institut verwendete Methode, welche auf einer Wartezeit von ca. 10min beruht, mit dem Verfahren der Flutung nach jeder Schweißlage verglichen.

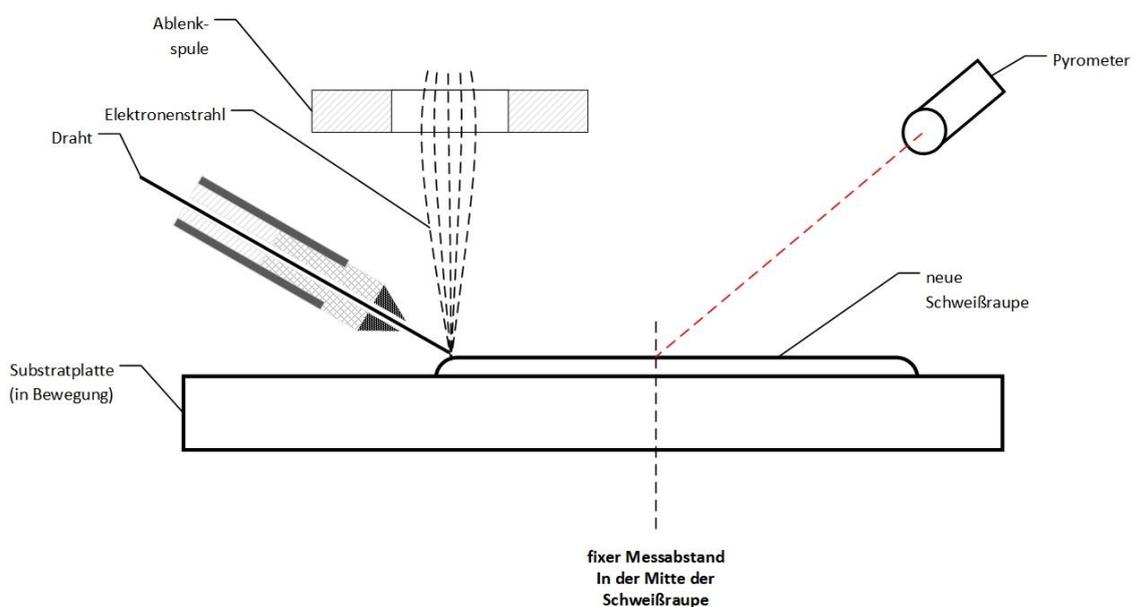


Abbildung 26: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaues Wände und Blöcke für einen fixen Punkt auf der Schweißnaht

4 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden ausgewählte Ergebnisse der zuvor angeführten unterschiedlichen Messvarianten erläutert. Zu Beginn der Versuche galt es einen geeigneten konstanten Emissionskoeffizienten für den Werkstoff Ti-6Al-4V und das Gesamtsystem zu bestimmen, welcher für alle nachfolgenden Versuche verwendet werden konnte. Nach erfolgreicher Bestimmung dieser essentiellen Pyrometergröße wurden die Temperaturversuchsreihen für die AM Strukturen: 1) Single-Wall, 2) Double-Wall und 3) Block Anordnung durchgeführt.

4.1 Emissionsgradbestimmung

Nicht alle durchgeführten Versuche werden nachfolgend dargestellt und betrachtet, sondern vielmehr werden die im Zuge der Messung aufgetretenen Charakteristika exemplarisch an ausgewählten Ergebnissen erörtert. Eine Übersicht aller durchgeführten Versuche und deren Ergebnisse zur Bestimmung des Emissionsgrades kann aus dem Anhang entnommen werden.

Zu Beginn der ersten Versuche stand die Ermittlung der Prozessgrößen für das Pyrometer und des Pyrometerschutzsystems im Vordergrund. Die wichtigsten Fragen die es dabei zu beantworten galt waren unter anderem die erforderliche Mindestdrehzahl der Filmrolle um eine kontinuierliche Messung zu ermöglichen, die Auswirkungen der Schweißbedingungen (Emission z.B. Strahlung und Wärme, mechanische Belastung z.B. Zug, etc.) auf die Polyimidfolie, sowie die Bestimmung eines geeigneten konstanten Emissionskoeffizienten für das System. Es gilt jedoch auch die Tatsache zu beachten, dass ein konstanter Emissionskoeffizient nicht über den gesamten Messbereich des Pyrometers (150° bis ca. 1200°C) exakte Temperaturwerte liefern kann. Das Ziel dieser Arbeit lag in der Ermittlung eines Koeffizienten, welcher einen möglichst geringen relativen Fehler zwischen Pyrometer und Thermoelementen Temperaturzyklus über den gesamten Messbereich liefern sollte.

Bei der Auswertung der Messdaten stach vor allem der in Abbildung 27 dargestellte kontaktlos gemessene Temperaturverlauf hervor. Diese Emissionsgradbestimmung stellt insofern eine Besonderheit dar, weil bei diesem Versuch der Folientransport zu Beginn der Messung (Bereich 1-2) nicht aktiv war und erst später (Bereich 3-5) zugeschaltet wurde. Insofern eignet sich dieser Fall besonders gut um charakteristische Merkmale während der Messung aufzuzeigen und darzustellen.

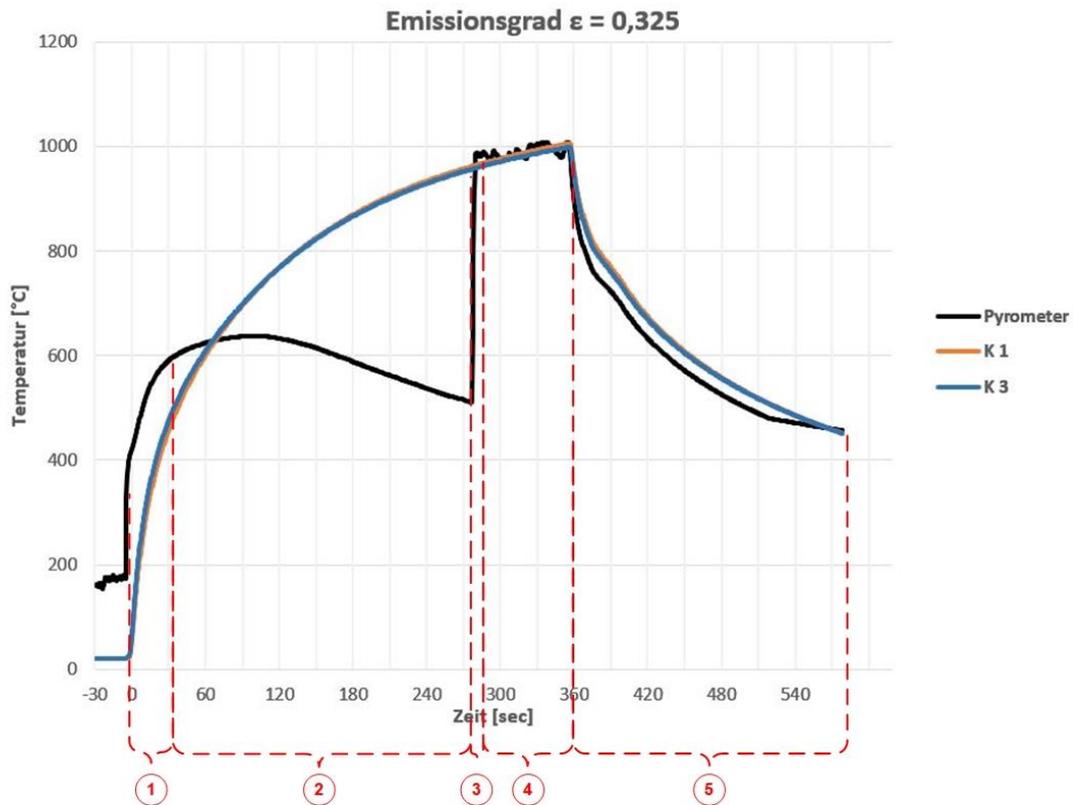


Abbildung 27: Exemplarisch ausgewählter kontaktlos gemessener Temperaturverlauf zur Bestimmung des Emissionsgrads

Zur besseren Übersicht und Erklärbarkeit werden die charakteristischen Bereiche jeweils einzelnen behandelt:

- Bereich 1:
 - Zu Beginn der Messung kommt es zu einer merklichen Differenz zwischen den aufgezeichneten Temperaturen gemessen mittels Pyrometer und den Thermoelementen. Während die Thermoelemente bereits bei Raumtemperatur (ca. 25°C) valide Werte aufzeichnen, liefert das Pyrometer erst Ergebnisse ab der unteren Messgrenze von 150°C. Nach dem Einschalten des Elektronenstrahles kommt es sofort zu einer relativen großen Diskrepanz zwischen dem in schwarz eingefärbten Kurvenverlauf des Pyrometers und den beiden Messgraphen der Thermoelemente in Orange und Blau. Dieser große relative Fehler zwischen den beiden Messsystemen wurde auf folgende Umstände zurückgeführt:
 - möglicherweise unpassender Emissionskoeffizient für diesen Temperaturbereich
 - Die verwendeten Messsysteme arbeiten mit unterschiedlichen Mess- und Aufzeichnungsraten. Das Pyrometer arbeitet mit minimal 5Hz, während die Thermoelemente maximal zwei Messungen in der Sekunde durchführen können. Dieser Unterschied führt zu einer gewissen Trägheit der Temperaturmessung mittels Thermoelemente im Vergleich zu der Temperatureaufzeichnung mittels Pyrometer.

- Der Unterschied der Messfleckgrößen von Thermoelement und Pyrometer. Die Messfleckgröße des Pyrometers ist aufgrund der technischen und räumlichen Gegebenheiten nicht weiter reduzierbar und weist mit einem Durchmesser von ca. 2mm im Vergleich zum Messpunkt der verwendeten Thermoelemente (\varnothing 0.2mm) einen signifikanten Unterschied auf (siehe Abbildung 33). Dieser Unterschied führt aufgrund der Temperaturmittelung über den Messfleck zu einer gewissen Verzerrung der Messwerte und der Messdynamik.
- Bereich 2:

Um den Einfluss der sich stetig aufbauenden Sperrschicht deutlich erfassbar zu machen wurde der Folientransport zu Beginn der Messung nicht aktiviert. Dieser Umstand führte dazu, dass nach 60 Sekunden ab einer Temperatur von ca. 600°C der Graph der Pyrometermessung eine deutliche Abflachung erfährt. Dieser Effekt verstärkte sich mit zunehmender Messdauer und hatte zur Folge, dass die mittels Pyrometer detektierte Oberflächentemperatur im Vergleich zur mittels Thermoelementen gemessenen Werte sich im weiteren Versuchsablauf immer deutlicher unterscheiden. Der Grund für dieses Verhalten lässt sich wie folgt erklären, der durch den Aufheizvorgang hervorgerufene Austritt an Metall-dampf schlägt sich permanent auf der Folienoberfläche nieder und es bildet sich ein deutlicher, schwarzer und beinahe undurchsichtiger Fleck (Abbildung 28 (a)). Die stetig wachsende Sperrschicht führt zu einer Änderung der Transmissivität der Messstrecke und resultiert in einer fälschlicherweise zu niedrig gemessenen Temperatur.

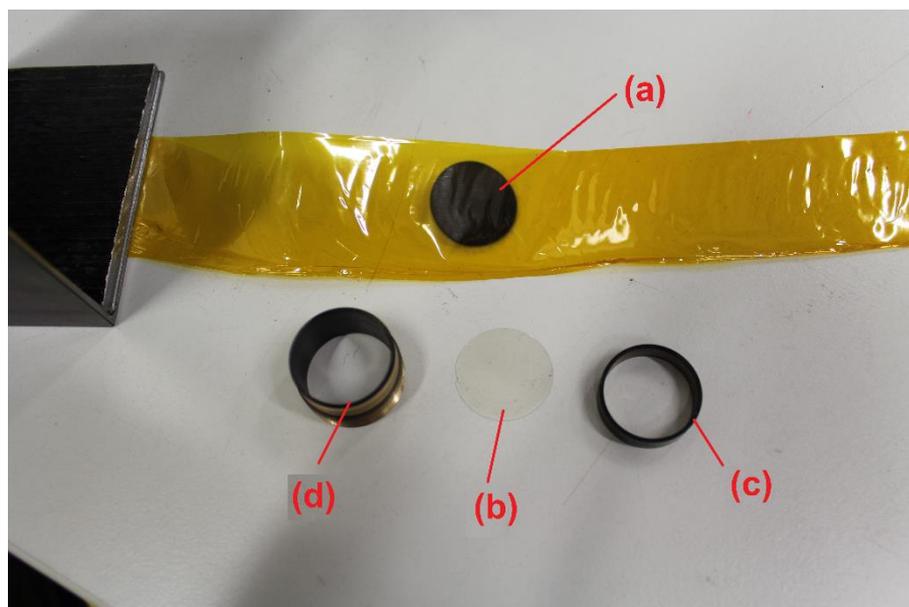


Abbildung 28: Emissionsgradbestimmung ohne Vorschub an Folienmaterial: a) deutlich sichtbare Sperrschicht an Folienoberfläche; b) zusätzliche Schutzglasscheibe praktisch ohne Beeinträchtigung; c) und d) Halterung der Schutzglasscheibe

- Nach Abschluss des Versuchs wurde zudem die zusätzlich angebrachten Sicherungsscheibe (Abbildung 28 (b)) vor dem eigentlichen Objektivglas des Pyrometers sowie die dessen Halterung (Abbildung 28 (c) und (d)) untersucht. Es wurde überprüft in wie weit sich die Ablagerungen an der bernsteinfarbenen Schutzfolie vorbei ausgebreitet hatten und ob die Messung durch unerwünschte Ablagerungen auf der Sicherungsscheibe beeinflusst wurde. Das Ergebnis dieser Kontrolle war äußerst zufriedenstellend, denn weder die Sicherungsscheibe noch die Halterung wiesen einen merklichen Beschlag auf.
- Bereich 3:
 - Durch die Aktivierung des Folientransportsystems wurde die zuvor bedampfte Folie weggefördert und stetig durch eine neue und nicht kontaminierte Folie ersetzt. Dies führte schlagartig dazu, dass die mittels Pyrometer detektierte Oberflächentemperatur wieder ungefähr jener der mittels Thermoelemente gemessenen Temperatur entsprach.
- Bereich 4:
 - Der Verlauf der Pyrometermesskurve weist einen im Vergleich zu den beiden gleichmäßig verlaufenden Graphen der Thermoelemente einen deutlichen „Zick Zack“ - Kurs auf. Dieses Verhalten konnte bei einer nachträglichen Untersuchung der Bauteilkomponenten folgenden Umständen zugeschrieben werden: 1) Ein zu niedrig gewählter Folienvorschub und 2) einer nicht gleichförmig ab- bzw. aufgewickelten Folie.
In Abbildung 29 sind die Auswirkungen eines zu niedrig gewählten Folienvorschubs ersichtlich, im Vergleich zu Folie (1) (unbenützt) weist Folie (2) einen merklichen „Beschlag“ an Metaldampf auf. Durch das ständige Weiterfördern an Folienmaterial entsteht aber keine negativer Temperaturtransient wie bei Punkt 2, sondern lediglich ein leicht verrauschter Temperaturverlauf.

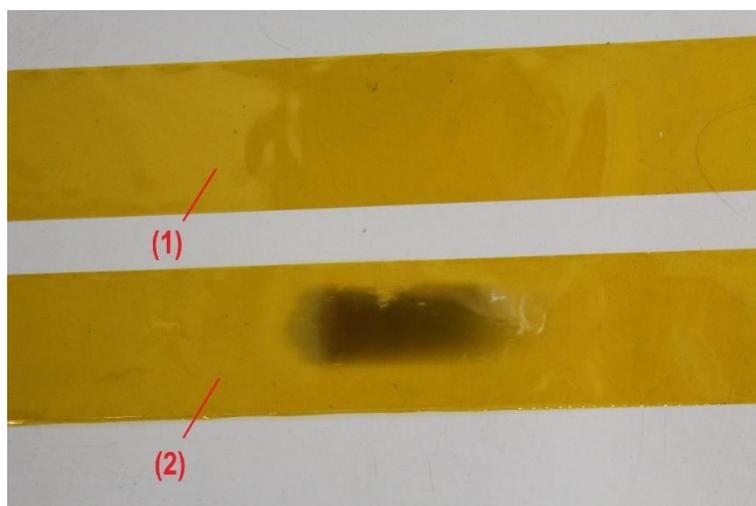


Abbildung 29: Emissionsgradbestimmung mit zu geringem Vorschub an Folienmaterial: 1) unbenütztes Folienmaterial und 2) verwendetes Folienmaterial

Das Resultat einer nicht gleichförmig ab- bzw. aufgewickelten Folie ist in Abbildung 30 ersichtlich. Im Vergleich von Folie (1) (unbenutzt) zu Folie (8) wird deutlich, wie sich eine nachlässige Justierung der Stellschrauben bzw. der Gehäusebestandteile auf das Wickelverhalten der Folie auswirkt. Bei unsachgemäßen Zusammenfügen der Gehäusebauteile kann es zu einer Schrägstellung der Filmpatronen zueinander kommen. Die Folge ist eine ungleichmäßige Zugbelastung des Filmmaterials, welche in den meisten Fällen eine starke Verwicklung der Poliyimidfolie hervorruft. Dies führt in weitere Folge zu einer nicht gleichförmig ablaufenden Drehbewegung was die Messung derart beeinflusst, dass kein stetig aufgezeichneter Temperaturverlauf zustande kommt. Im Extremfall ist die Folie auch abgerissen und das Objektiv des Pyrometers wäre ohne zusätzliche Schutzglasscheibe verunreinigt worden.

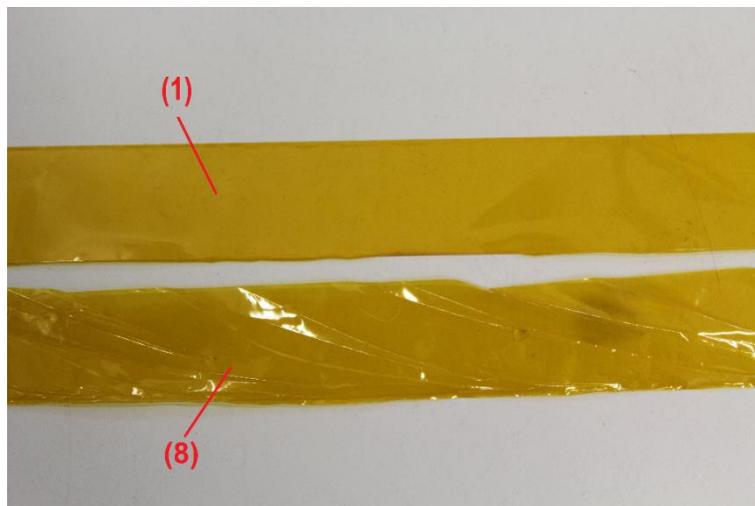


Abbildung 30: Emissionsgradbestimmung mit Wickelproblemen beim Folienmaterial: Folie 1.) unbenutzt und Folie 8.) weist deutliche Veränderungen auf

- Bereich 5:
 - Nach dem Ausschalten des Elektronenstrahles verlaufen die Abkühlkurven bei eingeschaltetem Folienvorschub trotz der zuvor erwähnten Probleme nahezu ident und liefern einen gleichförmigen Verlauf für Pyrometer- und Thermoelementmesskurve.

Zur Bestimmung eines geeigneten Emissionskoeffizienten für das Gesamtsystem aus Pyrometer, Schutzglasscheibe und Folie wurde für drei verschiedene Koeffizienten zwei unterschiedliche Positionierungssetups verwendet (siehe Abbildung 18 Abbildung 19 und Abbildung 31). Das Ziel dieser Versuche war die Bestimmung eines geeigneten Koeffizienten (z.B. für ca. 1000°C) mit dazugehörigem Folienvorschub, welcher einen möglichst geringen relativen Fehler zum Oberflächenmessergebnis der Thermoelemente aufweist.

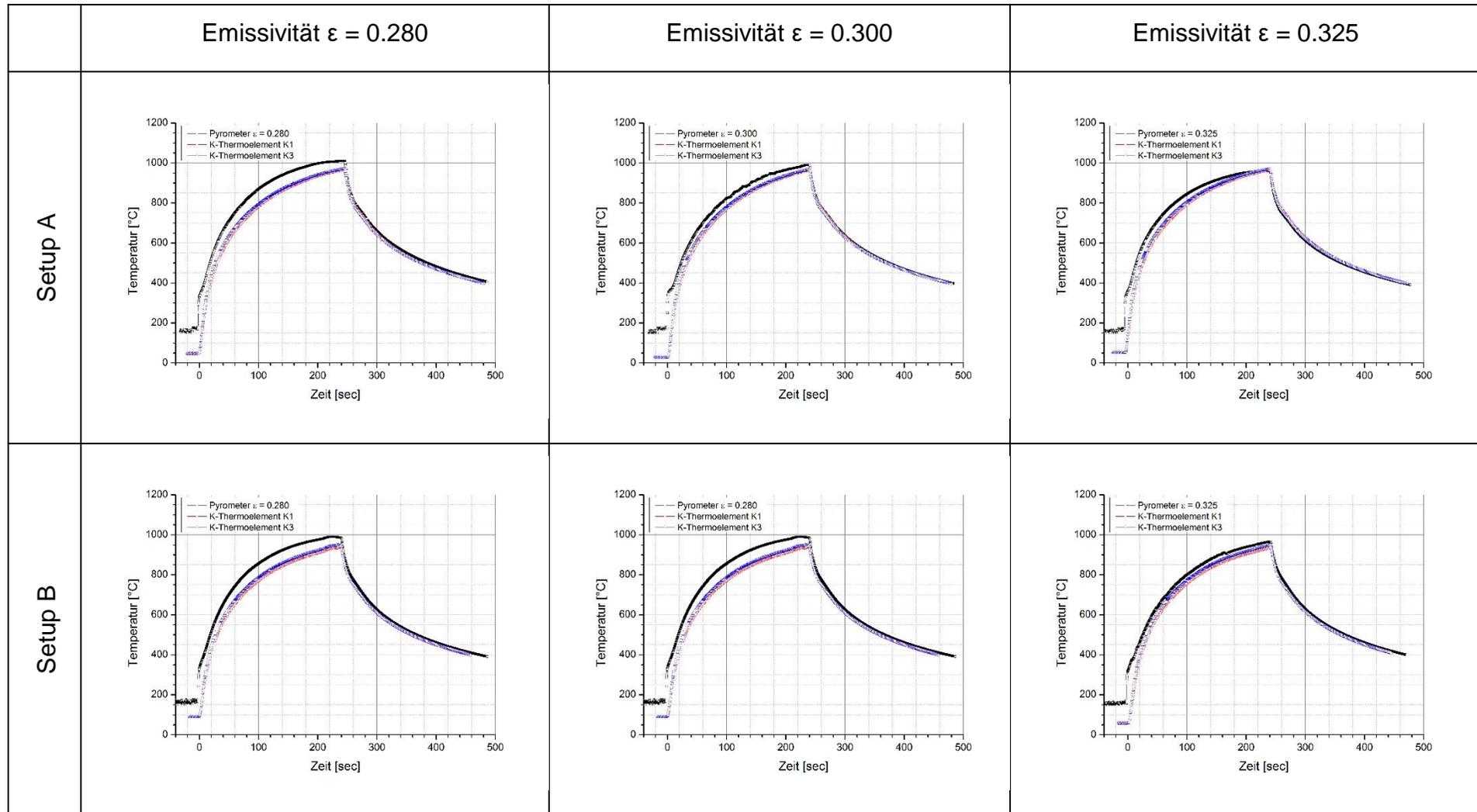


Abbildung 31: Darstellung der unterschiedlichen Temperaturverläufe aufgedgliedert in Emissivität und verwendetem Setup

Um die Ergebnisse der einzelnen Versuche besser vergleichbar und auswertbar zu machen wurden die einzelnen Messergebnisse der jeweiligen Versuchsreihe quantitativ in Abbildung 32 zusammengeführt und ausgewertet. Als Referenztemperaturwert wurde der gemittelte Temperaturwert von Thermoelement K1 und K3 gewählt. Der Unterschied der Pyrometermessdaten zu den mittels Thermoelementen ermittelte tatsächliche Oberflächentemperatur wird als relativer Fehler (in weiterer Folge als Abweichung bezeichnet) über der Temperatur dargestellt.

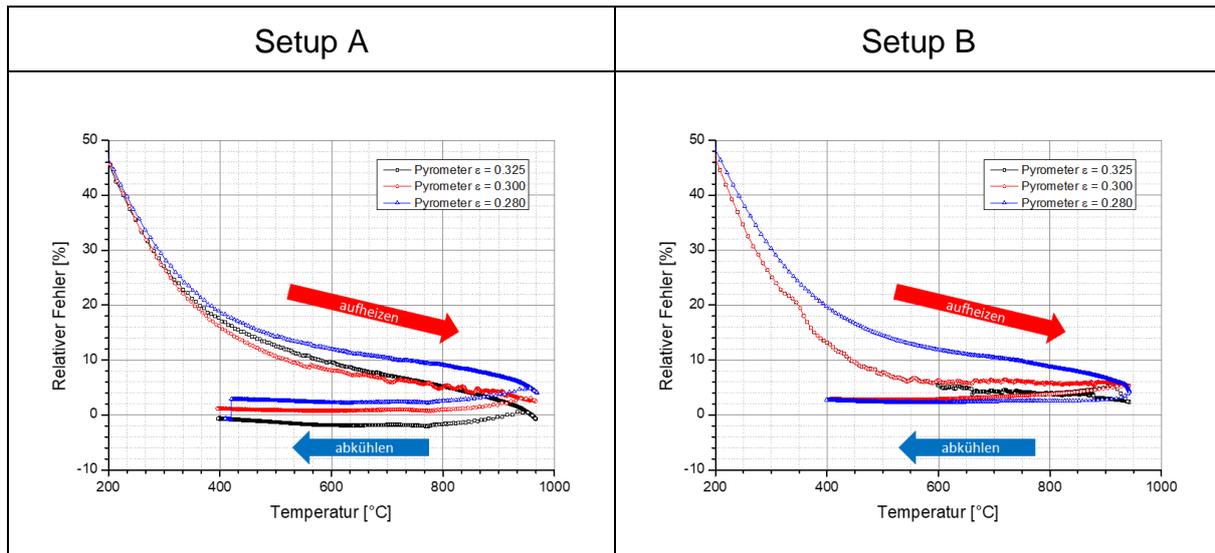


Abbildung 32: Quantitative Auswertung der Messergebnisse für die Bestimmung der Emissionskoeffizienten der zwei verwendeten Setups

Wie in Abbildung 32 ersichtlich bestand bei beiden Versuchsreihen vor allem zu Beginn der Aufheizphase zwischen den Temperaturverläufen eine sehr große Abweichung. Dieser Umstand wurde vor allem dem wahrscheinlich unpassenden Emissionskoeffizienten für niedrige Temperaturbereiche sowie der unterschiedlichen Messfleckgrößen der beiden verwendeten Messmethoden zugerechnet. Wie in Abbildung 33 dargestellt spielt die Größe des Messflecks eine entscheidende Rolle, die Oberflächentemperatur wird bei den Thermoelementen fast punktförmig (ca. 0,2mm Durchmesser Thermoelement) gemessen während die Temperatur innerhalb des Messflecks vom Pyrometer (ca. 2mm im Durchmesser) über die gesamte Fläche gemittelt wird. Diese Diskrepanz in der Messfleckgröße und der damit verbundene Messunterschied wird vor allem in der sehr großen Abweichung (in beiden Setups über 40%) in der Aufheizphase deutlich sichtbar. Zu Beginn der Messungen erfährt das Bauteil eine starke Erwärmung was zu einem steilen Temperaturgradienten an den Messpunkten führt. Mit zunehmender Messdauer wird dieser Gradient aber anscheinend immer geringer und somit stimmen die gemittelten Temperaturen wieder recht gut überein (siehe in Abbildung 32 eine Abflachung der Aufheizkurve mit zunehmender Temperatur). Der Abkühlvorgang des Bauteils erfolgt mit einem weitaus geringerem Temperaturgradienten weshalb die einzelnen Abkühlkurven einen recht stabilen & flachen Verlauf aufzeigen. Dieser Einfluss eines steilen Temperaturgradienten sollte in der zukünftigen Pyrometeranwendung berücksichtigt werden. So sind Temperaturmessungen bei Prozessen mit raschen Temperaturänderungen (z.B. mehrere 100°C innerhalb weniger Sekunden) wenig aussagekräftig und es muss mit großen relativen

Messabweichungen gerechnet werden. Bei Prozessen mit flachen Temperaturgradienten (z.B. Abkühl- bzw. moderaten Aufheizvorgänge oder Interpassmessungen) spielt die Tatsache der gemittelten Temperatur des Pyrometermessflecks eine untergeordnete Rolle und es können relativ genaue Temperaturwerte gemessen werden (siehe Abbildung 32: bei passendem Emissionskoeffizienten beträgt die Temperaturabweichung einen niedrigen Prozentbereich).

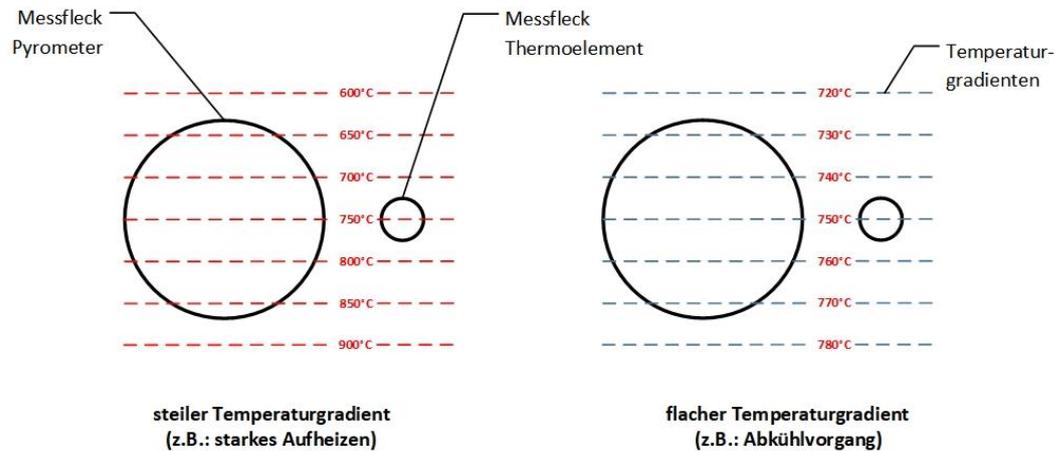


Abbildung 33: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Messfleckgrößen von Pyrometer und Thermoelement sowie der Einfluss von unterschiedlichen Temperaturgradienten

Bei der Betrachtung der einzelnen Verläufe (siehe Abbildung 32) zeigt sich ein schematisch ähnlicher Verlauf aller Ergebnisse unabhängig des gewählten Setups, wobei besonders folgende Punkte zu beachten sind:

- Beim Aufheizvorgang zeigen sich die Auswirkungen des großen/steilen Temperaturgradienten im Messbereich von Thermoelement und Pyrometer deutlich. Es kommt unabhängig vom Emissionskoeffizient und Positionierungssetup zu einer großen relativen Abweichung zwischen den gemittelten Thermoelementmesswerten und der Pyrometermessung. Diese Abweichung wird mit zunehmender Dauer und Temperatur aufgrund des kleiner werdenden Temperaturgradienten immer geringer und die Messkurven nähern sich der idealen Referenzlinie an. Dies führt zu einer immer größeren Übereinstimmung von Pyrometermesswert und tatsächlicher Oberflächentemperatur (Thermoelement).
- Nach Abschalten des Elektronenstrahls kühlt die Probe langsam und gleichmäßig innerhalb der Vakuumatmosphäre ab, und aufgrund des flachen Temperaturgradienten stellt sich eine nahezu konstante und geringer relativer Abweichung ein.
- Bei beiden Setups wird der Einfluss einer unzureichenden Fördergeschwindigkeit durch einen unruhigen und zappeligen Kurvenverlauf sehr gut ersichtlich (in beiden Fällen ist die Kurve mit $\varepsilon = 0.30$ ein gutes Beispiel hierfür). Als Abhilfemaßnahme wurde die Positionierung der Filmpatronen neu justiert sowie die Fördergeschwindigkeit des Filmmaterials angepasst und der Fehler somit behoben.

- Unabhängig vom Positionierungssetup liefert ein $\varepsilon = 0.325$ bei der gewünschten Zieltemperatur von 1000°C die geringste relative Abweichung und wird daher als Koeffizient weiterverwendet. Sowohl die sehr gleichartigen Verläufe als auch die ähnlichen Ergebnisse bei der Spitzentemperatur sprechen für ein valides Testverfahren um einen passenden Emissionskoeffizienten ermitteln zu können. Die Unterschiede in den einzelnen Ergebnissen und Verläufen werden vor allem der manuellen Positionierung der Messgeräte zugeschrieben. Wie bereits erwähnt spielt eine ungenaue Positionierung des Messfleckes in Relation zu den Messpunkten der Thermoelemente aufgrund der Temperaturmittelung des Pyrometers eine große Rolle. Erschwerend kommt die veränderte Messsituation zwischen den beiden Setups hinzu, sowohl Winkel als auch Distanz konnten beim zweiten Setup nicht exakt wie im ersten Aufbau wiedereingestellt werden (d.h. auch Einfluss auf die Pyrometermessfleckgröße). Die Gründe für diese leichte Fehlpositionierung liegen hauptsächlich in der geringen zur Verfügung stehenden Kammergröße der Anlage.

Gleichzeitig zur Bestimmung des Emissionsgrades war auch die Festlegung einer geeigneten Abspulgeschwindigkeit der Polyimidschutzfolie notwendig. Dabei musste ein Kompromiss zwischen möglichst geringem Verbrauch (und damit verbundener möglichst hoher Einsatzzeiten) der Folie und dem gerade noch vertretbaren Maß an Sperrschichtdicke gefunden werden. Die Bestimmung einer geeigneten Motordrehzahl erfolgte sowohl optisch durch die Begutachtung bereits verwendeter Folien sowie durch Auswertung der Ergebnisse der einzelnen Versuchsreihen. Eine Mindest-Fördergeschwindigkeit von ca. 10U/min sprich 5V Eingangsspannung für den Elektromotor ist ausreichend um eine stetige Temperaturmessung ohne Rauschen zu ermöglichen und einen signifikanten Beschlag und Aufbau der Sperrschicht an der Folienoberfläche zu vermeiden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass für den gesteckten Messrahmen ein ausreichend genaues Messergebnis der Oberflächentemperatur durch das Pyrometer mit einem Emissionsgrad $\varepsilon = 0.325$ und einer gewählten Nennspannung von 5V erzielt werden kann. Des Weiteren wurden einige Parameter und deren Einfluss auf das Messresultat bestimmt:

- Eine zu niedrig gewählte Emissivität resultiert in einer Überbewertung der gemessenen Oberflächentemperatur mittels Pyrometer.
- Bei zu niedrig gewählter Motordrehzahl wird der „Beschlag“ bzw. die Sperrschicht an der Oberfläche des Folienmaterials zu dick und die Aussage des Messergebnisses wird unzuverlässig. Solch eine Fehleinstellung wird während eines Versuches durch rauschende Messergebnisse und nachträglich bei Begutachtung des verwendeten Folienmaterials erkennbar.
- Die reibungsfreie Abwicklung der Folie hat wie die Ergebnisse aufzeigen ebenfalls einen großen Einfluss. Im Zuge der durchgeführten Versuche zeigte sich, dass besonders bei der Abwicklung es zum Stillstand bzw. gar zum Abreißen der Folie kommen kann. Eine solche Fehlentwicklung kann während des Messprozesses durch eine Fluktuation der aufgenommenen Stromstärke detektiert werden.

Als Grund für die unterschiedlichen Ergebnisse bei gleichen Emissionskoeffizienten werden einerseits die Umstände einer nicht vermeidbaren Toleranz, einer manuellen Positionierung und andererseits die vergrößerten Messfleckgröße des Pyrometers zugeordnet. Speziell der zweite Aspekt ist dabei zu berücksichtigen, die Ergebnisse der Pyrometermessung werden über die gesamte Größe des Messflecks gemittelt und führen bei solch einer Messkonstellation schnell zu ungenauen Ergebnissen.

4.2 Additiver Strukturaufbau

Nach erfolgreicher Bestimmung eines geeigneten Emissionskoeffizienten erfolgte der Aufbau von repräsentativen AM-Strukturen mittels additiven Aufbau. Der Temperaturverlauf für unterschiedliche Positionen relativ zum Strahlzentrum wurde für die verschiedenen Lagen und Spuren der AM-Strukturen ermittelt. Ziel der ersten Versuchsreihe war es den Einfluss der Bauteilgeometrie (z.B. steigende Lagenanzahl auf die quasistationäre lokale Spitzentemperatur) und der Temperaturentwicklung darzustellen. In der zweiten Versuchsreihe sollte der Einfluss der Geometrie auf das Abkühlverhalten des Bauteils bestimmt werden.

4.2.1 Temperaturentwicklung an repräsentativen AM-Strukturen

Es werden ausgewählte Ergebnisse nachfolgend betrachtet und diskutiert. Die jeweiligen Temperaturverläufe mit unterschiedlicher relativer Position zum Strahlzentrum wurden synchronisiert und übereinander gelegt (siehe Abbildung 34) um Rückschluss über das Temperaturfeld für verschiedene AM-Strukturen während des Prozesses zu erhalten.

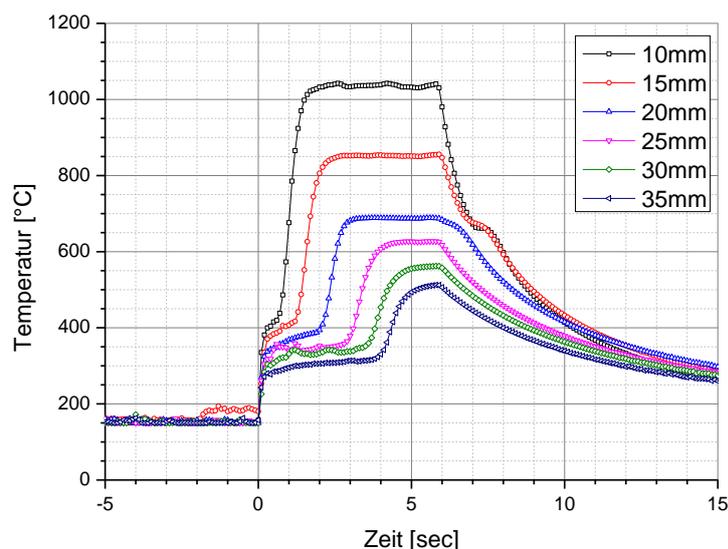


Abbildung 34: Temperaturmessung der AM-Struktur Double-Wall für die erste Lage mit Abständen von 10 bis 35mm zwischen Messfleck Pyrometer und Strahlzentrum Elektronenstrahl

Als gemeinsamer Startpunkt der Temperaturverläufe wurde der erste Temperaturanstieg der Substratplatte, welcher durch das Einschalten des Elektronenstrahls und dem Aufbringen des Schweißzusatzes herbeigeführt wird, gewählt. Der zweite signifikante Temperatursprung erfolgt durch den Übergang des Messpunktes von Substratplatte auf Schweißnaht und einem merklichen Anstieg der Oberflächentemperatur. Die im Anschluss gemessene annähernd konstante Spitzentemperatur stellt die quasi stationäre Temperatur für die jeweilige relative Position zum Strahlzentrum (z.B. 10 mm) dar. Durch die Kenntnis dieser beiden Temperatursprünge ist es möglich den exakten Messabstand zwischen Strahlzentrum und Pyrometermessfleck zu berechnen. In Abbildung 35 wird der Temperaturtransient (die Änderung der Temperatur in °C über die Zeit) für die Double-Wall Struktur der ersten Lage aufgezeigt. Durch Umformen der Zeit-Weg-Funktion (14) in Gleichung (15) liefert die gemessene Zeit Δt zwischen den beiden Sprüngen multipliziert mit der Schweißgeschwindigkeit (9mm/s) die genaue Distanz zwischen Pyrometermessstelle und Strahlzentrum.

$$\text{Zeit - Weg - Funktion: } v = \frac{s}{t} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (14)$$

$v = \text{Schweißgeschwindigkeit } [m/s]$

$s = \text{Strecke } [m]$

$t = \text{Zeit } [s]$

$$\text{Messdistanz: } s = v * \Delta t [mm] \quad (15)$$

$s = \text{Messdistanz } [mm]$

$\Delta t = \text{Zeitdifferenz zwischen den Temperatursprüngen } [s]$

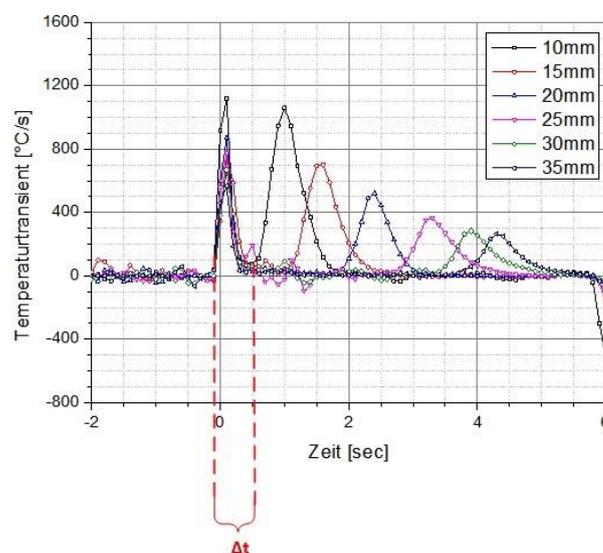


Abbildung 35: Temperaturtransient für die erste Lage der AM-Struktur Double-Wall mit eingezeichnetem Δt für die erste Schweißraupe und 10mm Messdistanz

4.2.1.1 AM-Struktur „Single-Wall“

Beim Aufbau von der AM-Struktur „Single-Wall“ zeigte sich, dass mit zunehmender Lagenanzahl die quasi stationäre Temperatur steigt. Wie aus Abbildung 36 ersichtlich wird konnte die erste Lage noch innerhalb der Messgrenzen des Pyrometers aufgezeichnet werden. Die zweite und dritte Lage überschritten bei einer Messdistanz von 10mm die obere Messgrenze von 1200°C.

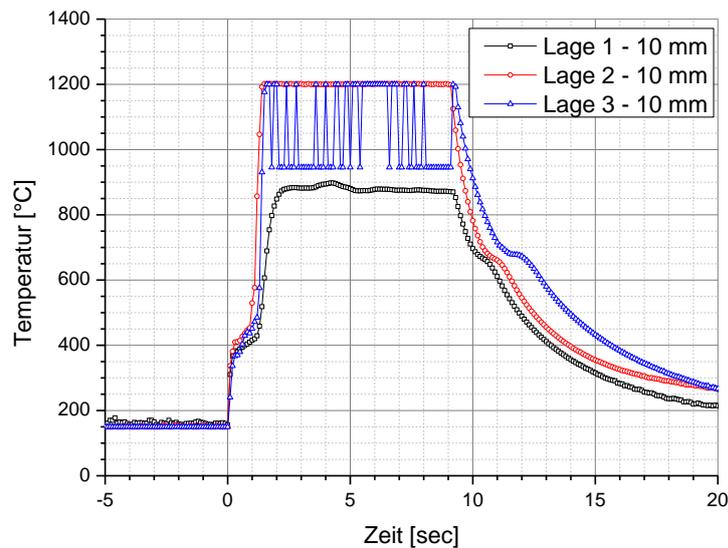


Abbildung 36: Temperaturfeld AM-Struktur Single-Wall für die erste Lage

Eine weitere Besonderheit der Versuchsreihe stellte die Tatsache dar, dass nur drei anstelle von vier Lagen aufgeschweißt werden konnten. Grund dafür könnten Wärmeleitungsprobleme sein, welche durch ein signifikantes Alternieren der quasi stationären Temperatur durch die Temperaturmessung aufgedeckt wurden. Wie in Abbildung 36 und Abbildung 37 ersichtlich steigern sich diese Temperaturschwankungen mit steigender Lagenanzahl.

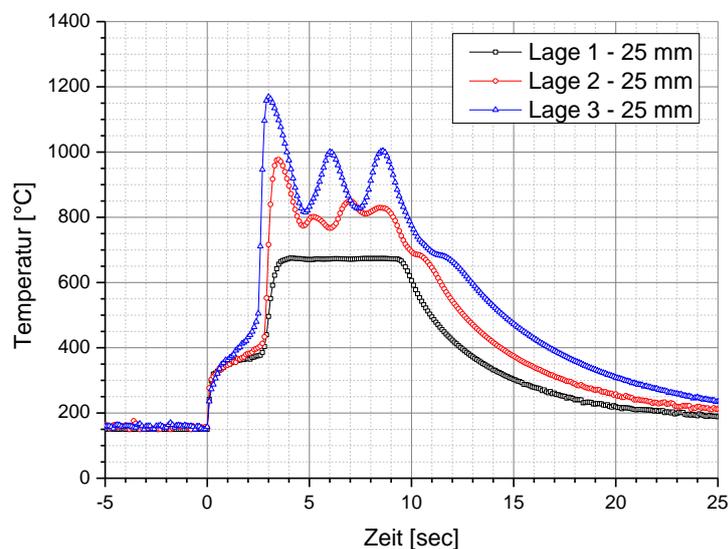


Abbildung 37: Ergebnis „Single-Wall“ Messdistanz 25mm

Während die Temperaturentwicklung in der ersten Lage noch eine nahezu konstante quasi stationäre Temperatur von 670°C aufweist, zeigen die nachfolgenden Lagen abweichende und pendelnde Spitzentemperaturen, z.B. in den ersten Sekunden der zweiten Lage schnellte die Temperatur auf fast 1000°C und pendelte sich im weiteren Verlauf um die 800°C ein.

Nach dem Öffnen der Vakuumkammer erfolgte eine visuelle Beurteilung der aufgetragenen Schweißraupen. Es zeigte sich, dass das Schmelzbad nicht gleichmäßig auf der darunterliegenden Raupe erstarren konnte, sondern die Erstarrung unregelmäßig in Form von Hügeln und Tälern erfolgte (siehe Abbildung 38). Es kann vermutet werden, dass die wellenförmigen Oberfläche aufgrund unpassender Schweißparameter zustande kam.



Abbildung 38: AM-Struktur „Single-Wall“ mit auftretendem „*humping phenomenon*“

Dieser als „*humping phenomenon*“ bezeichneter Effekt ist in der Literatur bekannt [44] [45] [46], jedoch für die drahtbasierte additive Fertigung mittels Elektronenstrahl noch nicht berichtet worden. Die exakte physikalische Ursache hierfür wurde noch nicht gänzlich eindeutig bewiesen, jedoch wurde ein signifikanter Einfluss der Schweißgeschwindigkeit und Fördergeschwindigkeit auf die Ausprägung des Effektes nachgewiesen [44] [45] [46]. Experimentelle Untersuchungen zeigen, dass schon eine geringe Änderung der Geschwindigkeiten zu einer Unterdrückung dieses Effektes führen kann und auch möglicherweise eine Abhilfe für den im Zuge dieser Untersuchung verwendeten Prozess schaffen könnte. Jedoch wurde aufgrund von Vergleichbarkeit der Ergebnisse zueinander auf eine Änderung der Geschwindigkeiten bzw. Streckenenergie abgesehen.

Die starke Schwankung der gemessenen Temperatur lässt nur eine bedingt Aussage über die tatsächliche Oberflächentemperatur des Schweißgutes zu und in Anbetracht der resultierenden Geometrie nach der dritten Lage wurde auf eine die ursprünglich geplante vierte Lage verzichtet.

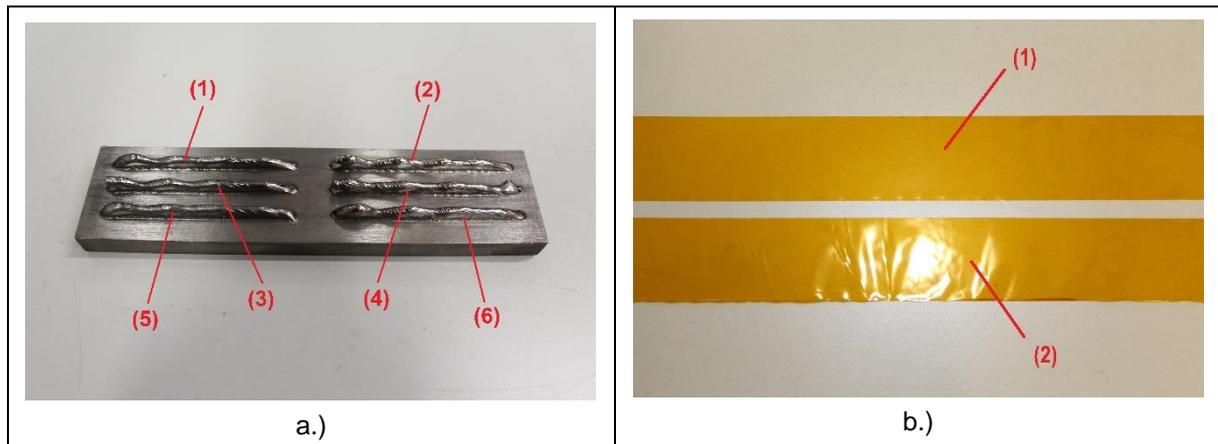


Abbildung 39: Optische Beurteilung AM-Struktur „Single-Wall“: a.) Aufgebaute und gereinigte Strukturen, und b.) saubere, nicht beschlagener Folienabschnitt

In Abbildung 39 Bild a.) sind die einzelnen additiv gefertigten Wände gut ersichtlich. Die Zahlen zeigen die Reihenfolge der Fertigung an. Zur besseren Darstellung wurde die Substratplatte als auch die einzelnen Wände von Verunreinigungen und Ablagerungen gesäubert. Der vorhin bereits beschriebene Effekt des „humpings“ ist deutlich sichtbar und zeigt sich an sämtlichen AM-Strukturen.

Der Zustand der verwendeten Folie ist in Abbildung 39 Bild b.) ersichtlich und weist wie sämtliche anderen Folienlängen eine äußerst zufriedenstellende Oberflächenzustand und keine Verschmutzung auf. Exemplarisch wurde ein Folienabschnitt (2) mit einer unbenützten Folie (1) verglichen und es wurden keine merkliche Verfärbungen oder Beschlag festgestellt.

4.2.1.2 AM-Struktur „Double-Wall“

Im Gegensatz zu der AM-Struktur „Single-Wall“ wird diese Geometrie mit zwei Spuren nebeneinander und schichtweise aufgebaut. Es konnte ein wesentlich gleichmäßigerer Temperaturverlauf für die erste als auch die zweite Spur beobachtet werden.

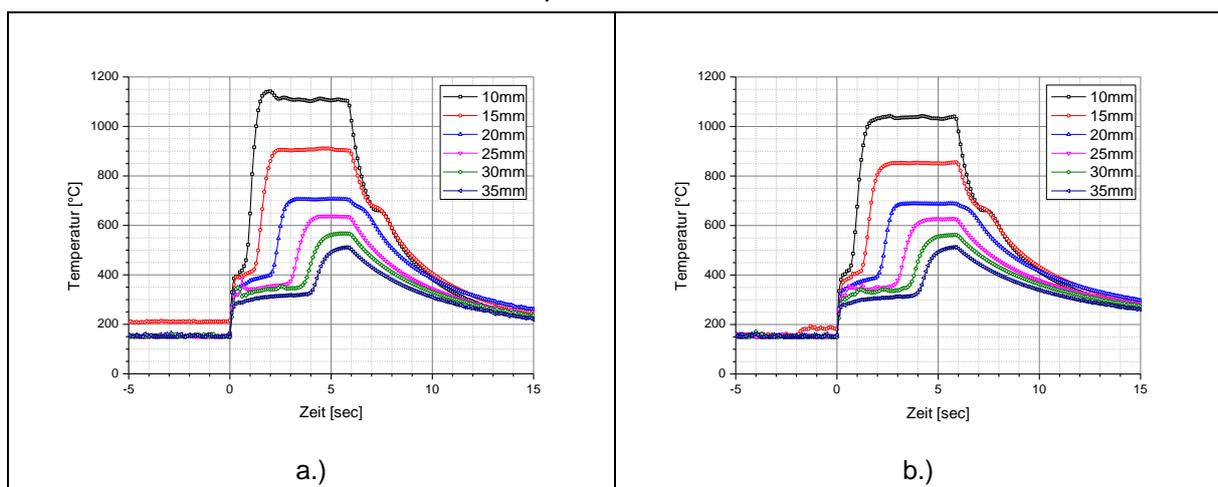


Abbildung 40: Temperaturverläufe für verschiedene relative Abstände AM-Struktur „Double-Wall“ a.) erste Spur und b.) zweite Spur

Zusätzlich konnte festgestellt werden, dass die Spitzentemperatur der ersten und zweiten Spur in der gleichen Lage je nach Abstand sich merklich voneinander unterscheiden (siehe Abbil-

dung 40 und Abbildung 41). Während die erste Naht noch eine höhere quasi stationäre Temperatur aufweist, kommt es bei der zweiten Naht, welche sich mit der ersten Naht überlappt, zu niedrigeren Temperaturen. Diese Abweichung erklärt sich aus der vergrößerten Oberfläche und dem benachbarten Volumen über den die Wärme abgegeben werden kann. Dieser Effekt wurde vor allem bei 10 und 15mm Messdistanz zwischen Messfleck Pyrometer und Strahlzentrum festgestellt, ab einer Messdistanz von 20mm und mehr wurde eine solche Abweichung nicht mehr detektiert.

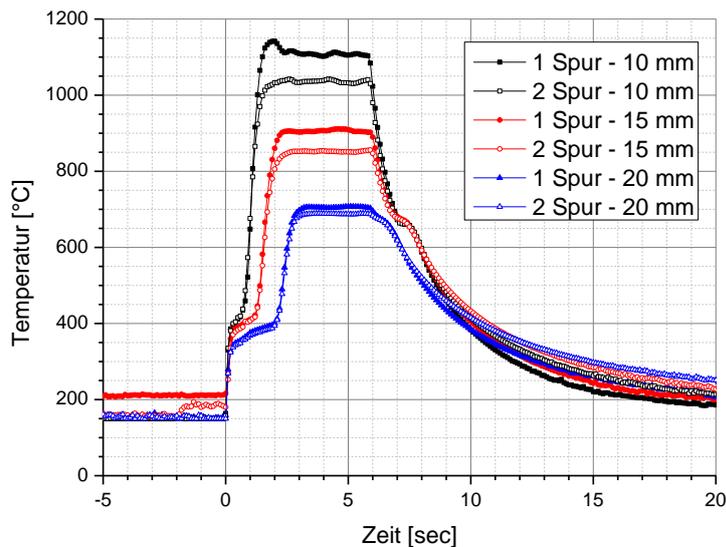


Abbildung 41: Temperaturzyklus der ersten Lage für die erste und zweite Spur der AM-Struktur „Double-Wall“

In Abbildung 42 ist die Temperaturentwicklung der Schweißfolge über die Zeit dargestellt und zusätzlich wurde auch die korrigierte, berechnete Distanz zwischen Pyrometermessfleck und Strahlzentrum angeführt. Es wird deutlich, dass die Positionierung des Messflecks große Probleme bereitet hat. Die wichtigsten Gründe die eine solch große Abweichung zwischen dem Sollwert von z.B. 15mm und den tatsächlich berechneten Messdistanzen erklären sind unter anderem:

- Unkenntnis des exakten Mittelpunktes des Strahlzentrums sowie auch der Beginn und Ort des Abschmelzens des Schweißzusatzes. Als Bezugspunkt beim Einrichten wurde das Ende des Schweißdrahtes herangezogen. Die Länge zwischen Ende Schweißdraht und Ende Schweißdüse variiert aber zwischen den einzelnen Schweißprozessen um einige Millimeter und eignet sich daher in nachträglicher Betrachtung nur bedingt als Referenzpunkt. Mögliche Lösung wäre ein mittels Elektronenstrahl produzierter Referenzpunkt an der Oberfläche der Substratplatte um den Pyrometermessfleck ausrichten zu können.
- Der Durchmesser des Pyrometermessflecks lies mit seinen ca. 2mm einen gewissen Spielraum bei der Positionierung zu,
- und sicherlich spielten auch manuelle Positionierungsfehler bei der Einrichtung der Messdistanz eine gewisse Rolle.

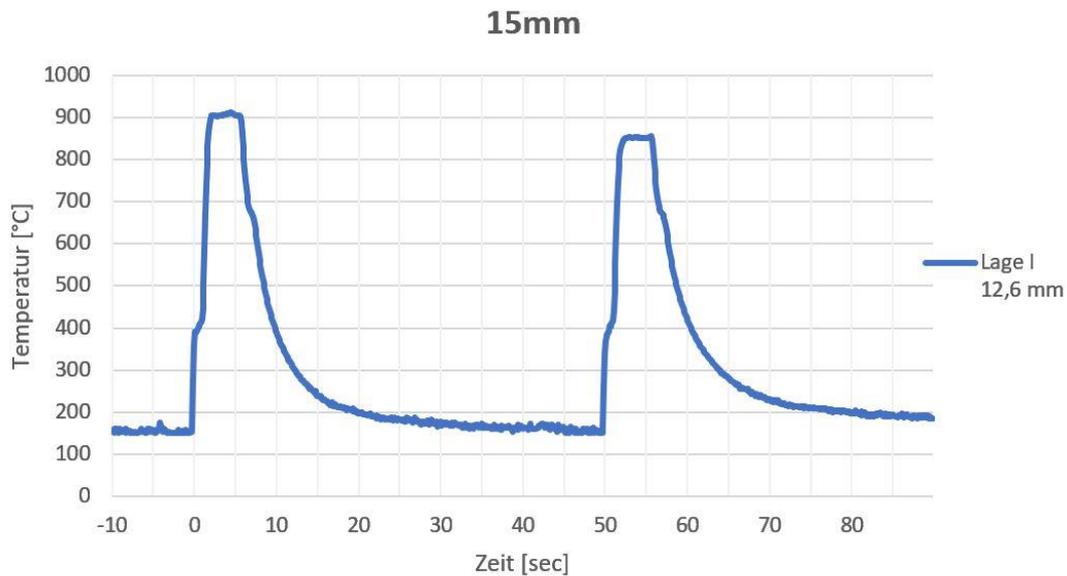


Abbildung 42: Temperaturverlauf der ersten Lage des AM Bauteils „Double Wall“ mit einer Messdistanz zwischen Pyrometermessfleck und Strahlzentrum von 15mm

In Abbildung 43 Bild a.) sind die additiv gefertigten doppelzeiligen Wände entsprechend ihrer Schweißfolge gekennzeichnet und zeigt die Substratplatte mit ihren AM-Strukturen in der Spannvorrichtung. Trotz einem eher unruhigen Schweißverhalten und Materialtransports ab der dritten Lage sind eine gleichmäßige und ebene Oberfläche der Strukturen erkennbar. Zur Kontrolle wurde auch hier die Schutzfolie laufend begutachtet und es wurde keinerlei Verfärbung oder Anzeichen für Beschlag an allen verwendeten Laufmetern festgestellt. Als exemplarisches Beispiel ist in Abbildung 43 Bild b.) eine verwendete Folie (2) und eine unbenutzte Folie (1) gegenübergestellt.

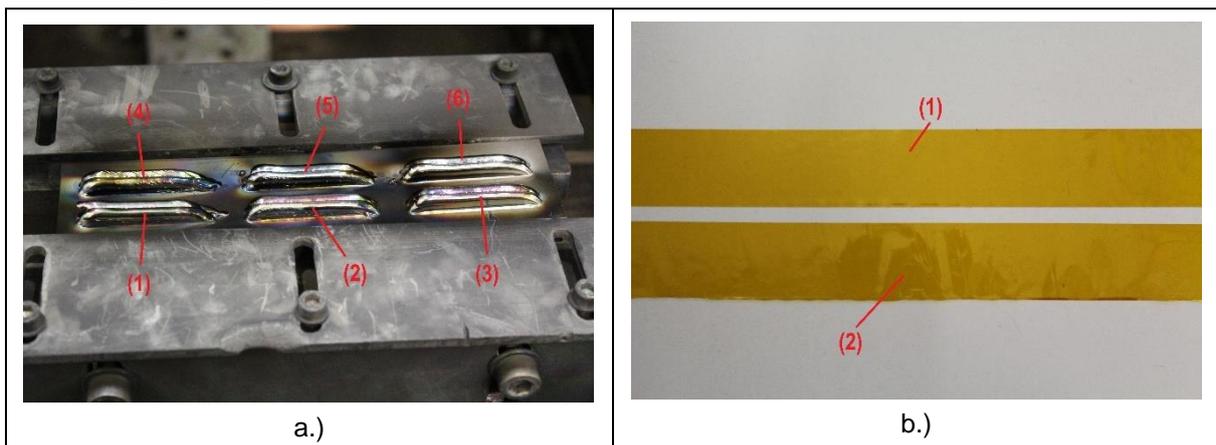


Abbildung 43: Optische Beurteilung AM-Struktur „Double-Wall“: a.) Aufgebaute und nicht gereinigte Strukturen, und b) saubere, nicht beschlagener Folienabschnitt

4.2.1.3 AM-Struktur „Block“

Um den Einfluss dickwandiger Bauteile darstellen zu können wurde auch eine fünfspurige Blockstruktur erzeugt.

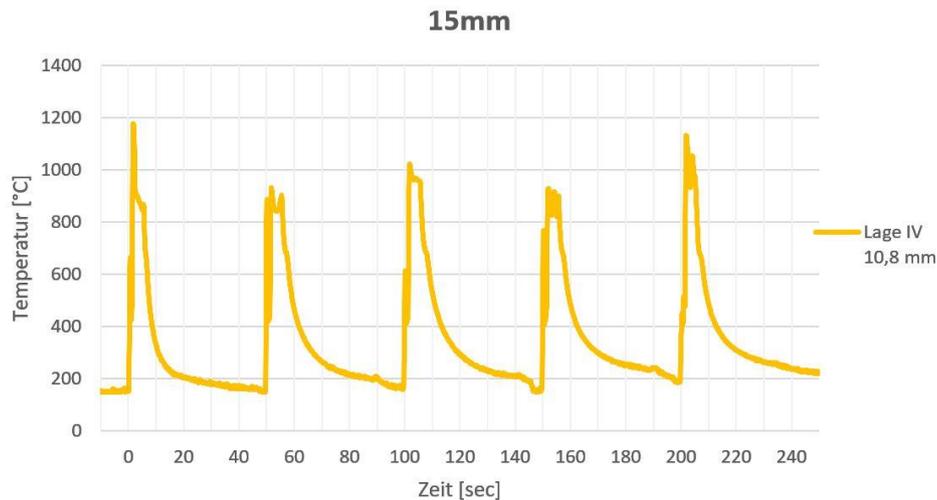


Abbildung 44: Temperaturverlauf der vierten Lage des AM Bauteils „Block“ mit einer Messdistanz zwischen Pyrometermessfleck und Strahlzentrum von 15mm

Eine Besonderheit stellt sicher die gewählte Schweißabfolge und deren Einfluss dar (siehe Kapitel 3), welche auf Basis von vorhergehenden Arbeiten gewonnen wurde. Der Einfluss der Schweißabfolge spiegelt sich auch im Profil der abgebildeten Temperaturkurve wieder (siehe Abbildung 44). Die erste Naht jeder neuen Lage entstand auf der mittleren Naht der vorhergehenden Lage, und besitzt keine benachbarte und sich überlappende Schweißraupe. Aufgrund dieser Besonderheit und der vermutlich damit verbundenen beeinträchtigten Wärmeabfuhr weist die erste Raupe die höchste gemessene Temperatur auf. Die zweite Naht werden direkt anliegend neben der Ersten aufgetragen und weist vermutlich durch die Schweißraupenüberlappung und größeren Anbindefläche ein signifikantes niedrigeres Temperaturlevel auf (dies gilt auch für die vierte Raupe) Die dritte Schweißraupe entstanden zwar ebenfalls mit stützender Wirkung einer benachbarten Schweißraupe, weist aber vermutlich aufgrund der Randlage sowie der Vorwärmung durch vorhergehenden Schweißraupen abermals eine erhöhte Temperatur auf (dies gilt ebenfalls für die fünfte Schweißraupe). Zur besseren Übersicht wurde in Abbildung 45 die Temperaturentwicklung aller Einzelraupen der ersten Lage mit steigender Messdistanz dargestellt.

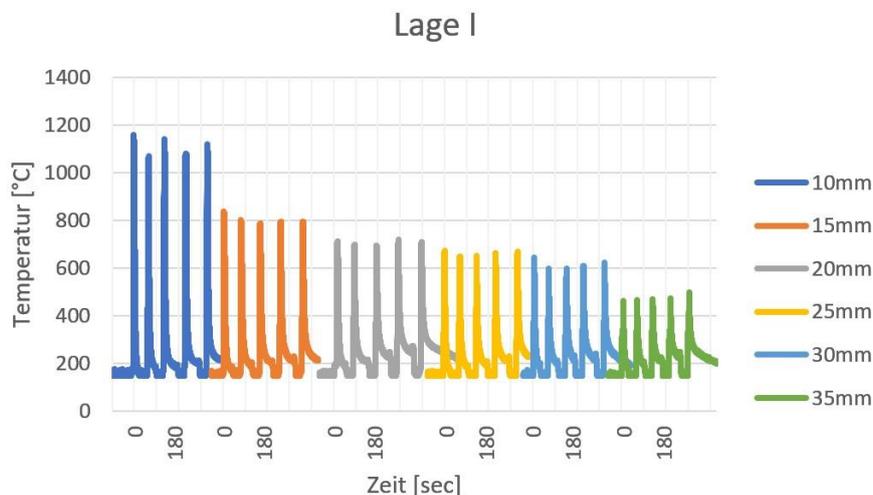


Abbildung 45: Temperaturentwicklung der erste Lage der AM Struktur „Block“

Abbildung 47: Optische Beurteilung AM-Struktur „Block“: a.) Aufgebaute und nicht gereinigte Strukturen nach der dritten Lage, und b.) nach der vierten Lage

4.3 Additive Strukturaufbauten und ihr Abkühlverhalten

Im Zuge der durchgeführten Versuche stellte sich auch die Frage des Einflusses der Zwischenschichttemperatur auf das Abkühlverhalten der AM-Strukturen.

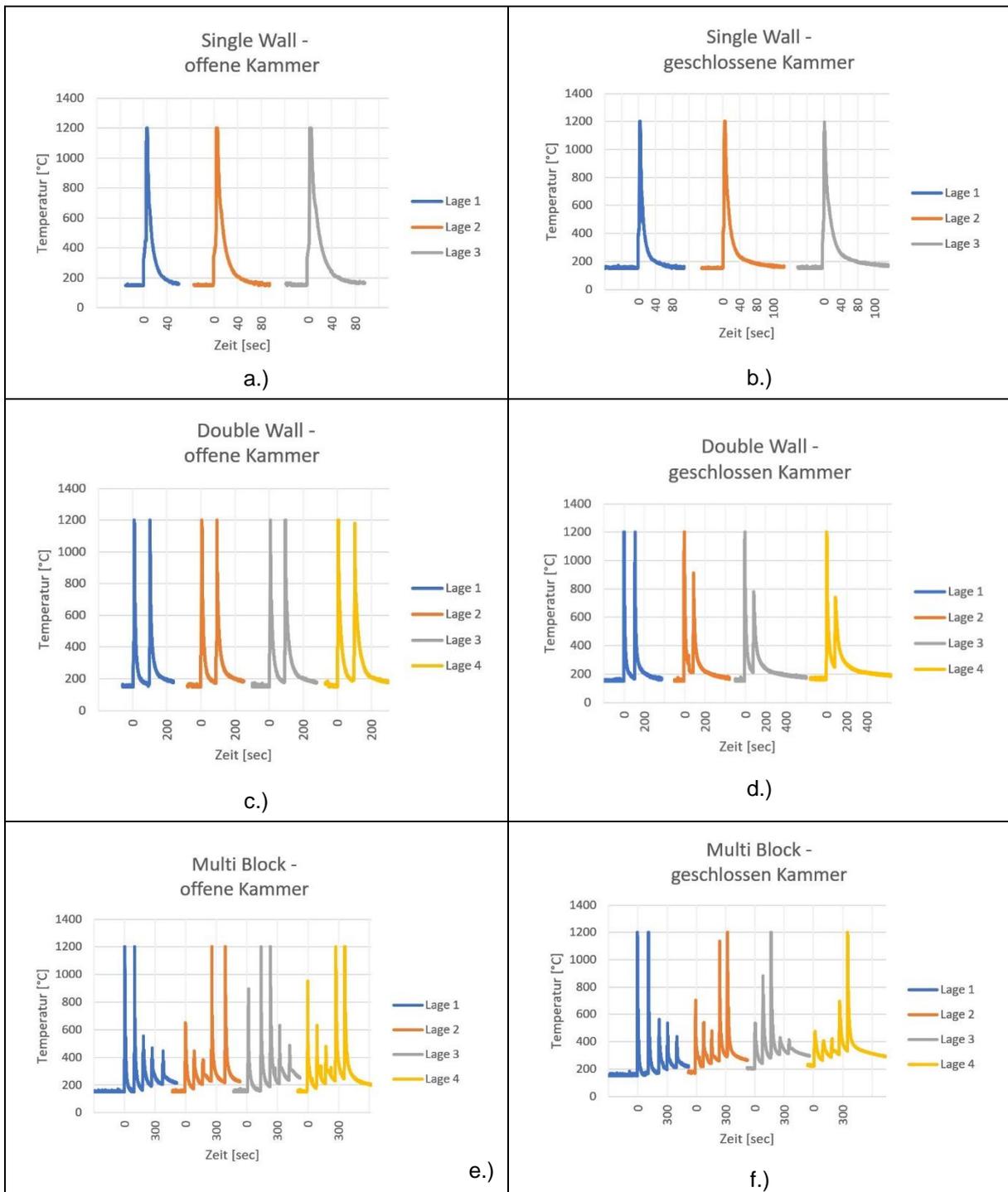


Abbildung 48: Temperaturgeschichte mit unterschiedlichen Abkühlstrategien für die AM-Strukturen: (a,b) „Single-Wall“, (c,d) „Double-Wall“ und (e,f) „Block“

Es wurden zwei verschiedene Abkühlstrategien angewendet und gegenübergestellt:

1. Nach jeder Schweißlage wird die Vakuumkammer geflutet (Konvektion und Wärmestrahlung) und das Bauteil vollständig auf Raumtemperatur abgekühlt (simuliert Extremfall mit unendlich langem Warten zwischen den Lagen)
2. Die AM-Struktur verbleibt unter Vakuum (Wärmestrahlung) und wird kontinuierlich gefertigt mit 10 minütiger Pause zwischen den jeweiligen Lagen (bisherige Ansatz bzgl. thermischen Management).

Die AM-Strukturen „Single-Wall“, „Double-Wall“ und „Block“ wurden mit den unterschiedlichen Abkühlstrategien aufgebaut, und die Temperaturgeschichte eines fixen Punktes in der Mitte der Oberfläche der ersten Raupe aufgezeichnet (siehe Abbildung 26).

Die „Single-Wall“ Versuche (siehe Abbildung 48 a,b)) mussten wie zuvor nach der dritten Lage abgebrochen werden aufgrund des bereits beschriebenen „*humping*“ - Effekts. Für die AM-Strukturen „Double-Wall“ und „Block“ traten aber keine Unregelmäßigkeiten oder etwaige Prozessstörungen auf.

Eine Auffälligkeit stellen die Ergebnisse der „Double-Wall“ Versuche (siehe Abbildung 48 d) dar. Der Messfleck des Pyrometers wurde anscheinend nicht exakt genug ausgerichtet und eine zu niedrige Spitzentemperatur der zweiten Spur gemessen. Durch die Überlappung der beiden Spuren und eine ungenaue Positionierung des Messflecks wird die benachbarte Schweißnaht anteilmäßig mitgemessen. Wie in Abbildung 49 dargestellt kann es bei einer Nahtbreite von 6mm und einem Nahtabstand von nur 4mm in Verbindung mit einem relativ großen Pyrometermessfleck von 2mm zu solchen Messfehlern kommen.

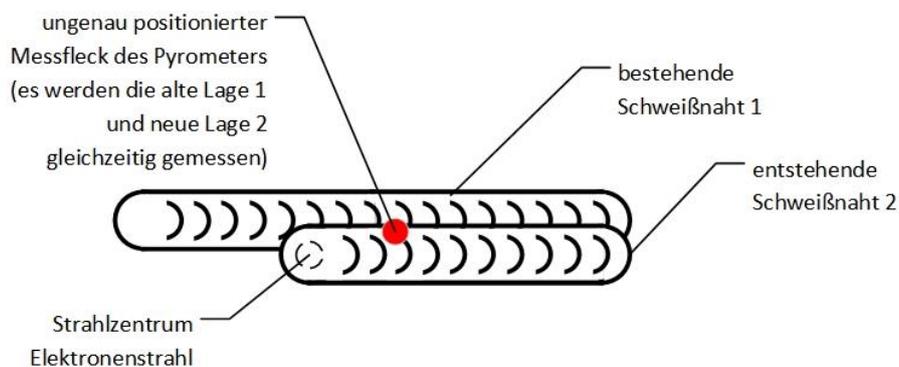


Abbildung 49: schematische Darstellung eines Positionierungsfehlers vom Pyrometermessflecks und dessen Auswirkung auf das Messergebnis

Diese Positionierungsungenauigkeit trat auch bei der AM-Struktur „Block“ (Vergleiche Abbildung 48 e,f) in abgeschwächter Form auf, weshalb auch diese Ergebnisse eine Verzerrung aufzeigen. Speziell die dritte als auch die vierte Lage weisen bei einzelnen Spuren eine unrealistisch niedrige Oberflächentemperatur auf. Eine genaue Auswertung und Interpretation der Daten erfolgt im nachfolgenden Kapitel.

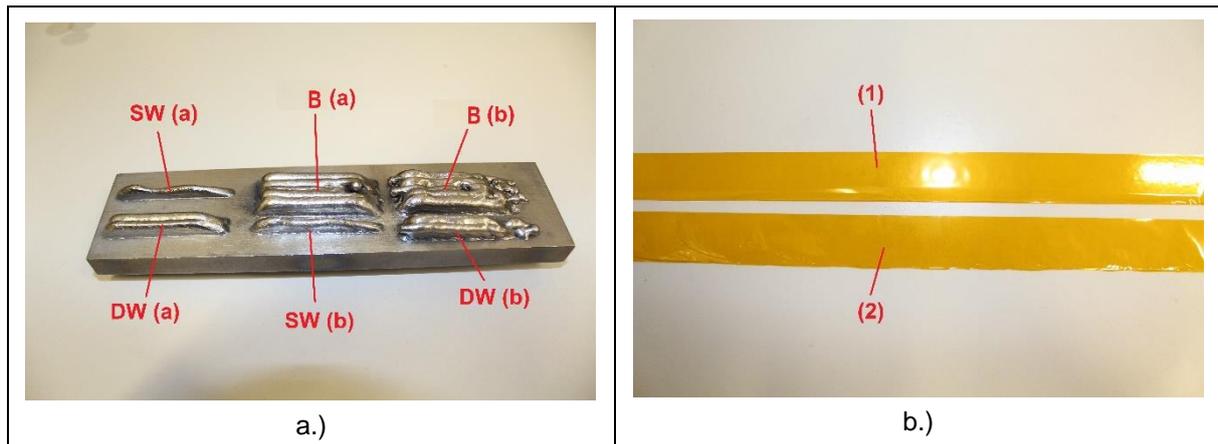


Abbildung 50: Optische Beurteilung AM-Strukturen mit unterschiedlicher Abkühlstrategie: a.) Aufgebaute und gereinigte Strukturen, und b) saubere, nicht beschlagener Folienabschnitt

Das optische Ergebnis der AM-Strukturen „Single-Wall“ (SW), „Double-Wall“ (DW) und „Block“ (B) für die unterschiedlichen Abkühlstrategien Kammerfluten (a) sowie 10 Minuten Wartezeit (b) sind in Abbildung 50 a.) ersichtlich. Die AM-Strukturen SW(a) und SW(b) (detaillierte Ansicht in Abbildung 51 die Punkte 1.1 und 1.2) zeigen abermals deutliche Hügel und Täler, und sind das Ergebnis einer unkontrollierten Schmelzbadbewegung und Erstarrung. Der optische Zustand der AM-Struktur DW(a) ist im Gegensatz zu DW(b) fehlerfrei (siehe Abbildung 51 Bereich 2.1 und 2.2). Das Schweißverhalten bei DW(b) war deutlich unruhiger und das Ergebnis der Schweißraupen deutlich ungleichmäßiger, dieser Umstand lässt sich möglicherweise auf die Restwärme und höhere Zwischenlagentemperatur des Bauteils zurückführen.

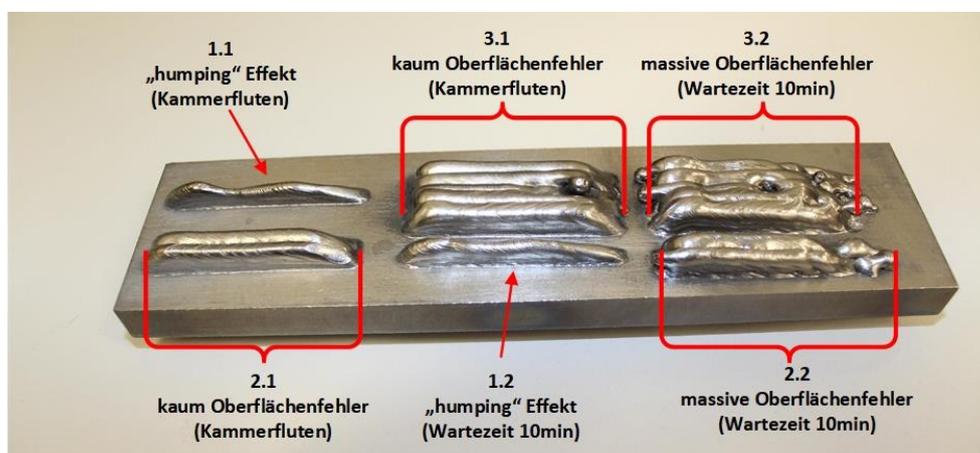


Abbildung 51: detaillierte Ansicht der Oberflächenbeschaffenheit der zweiten Versuchsreihe

Wie die Auswertung der Temperaturverläufe zeigt, stieg im Versuch mit konstanter Wartezeit die Temperatur mit jeder Schweißlage kontinuierlich an und resultiert in einer stetig steigenden Zwischenlagentemperatur. In der Versuchsreihe mit Kammerfluten und Abkühlen auf Raumtemperatur wurde die Zwischenlagentemperatur jedes Mal knapp unter 200°C nach dem Schweißen gedrückt. Ein identer Effekt wurde bei den AM-Strukturen B(a) und B(b) festgestellt, auch hier lieferte die Abkühlstrategie mit vollständigem Auskühlen auf Raumtemperatur durch Kammerfluten ein optisch ansprechenderes Ergebnis (siehe Abbildung 51 Bereich 3.1

und 3.2) als das Einhalten einer konstanten Wartezeit. Die stetig steigende Zwischenlagentemperatur der AM-Struktur „Block“ verlief aufgrund der größeren Wärmeeinbringung durch die gesteigerte Nahtanzahl noch ausgeprägter. Abermals wurde auch hier die verwendete Folie inspiziert (siehe Abbildung 50 b.), und ein benutzter Folienabschnitt (2) mit einer unbenützten Folie (1) verglichen. Es wurden optisch kaum Verunreinigungen oder Ablagerungen festgestellt.

5 Diskussion

Die in den vorhergehenden Kapiteln gesammelten Informationen und Ergebnisse werden nun diskutiert und ausgewertet. Im Vordergrund der Betrachtungen steht die selbstgebaute Schutzvorrichtung sowie die damit erzielten Ergebnisse.

5.1 Pyrometerschutz-Apparatur

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das zu Beginn dieser Arbeit gesetzte Ziel einer funktionstüchtigen Schutzvorrichtungsentwicklung erfolgreich erfüllt wurde und eine Oberflächentemperaturmessung mit dem angeschafften Pyrometer nun auch für alle anderen zukünftig geplanten Versuchsreihen an der TU Graz möglich ist. Die Messungen werden nun nicht mehr durch Metaldampf-Verunreinigungen an der Objektivoberfläche gestört und zukünftige Adaptionsmaßnahmen wurden durch vorrausschauende Bauteilwahl und genügend Erweiterungsspielraum Platz gelassen. Die im Zuge der Versuche angesammelten Erfahrungswerte zeigen eindeutig die Vorteile der neuen Apparatur. So lässt sich die Messvorrichtung mit unterschiedlichen Befestigungsarmen an beinahe jede gewünschte Messsituation (z.B. Messposition, Abstand und Winkel) innerhalb der Vakuumkammer anpassen.

Zur Handhabung während des Betriebes sind folgende Punkte positiv herauszuheben und zu bewerten:

- Die neu angeschaffte temperaturbeständige Polyimidfolie lässt sich einfach in die früher als Abfall geltenden Filmpatronen der CCT Kamera aufwickeln und abspielen.
- Der Austausch der Filmpatronen in der Pyrometerschutz-Apparatur erfolgt schnell und unkompliziert durch die Abnahme der oberen Hälfte des zweiteiligen Gehäuses.
- Der Drehwiderstand und die Ausrichtung der Filmpatronen sind durch die eingebauten Stellschrauben individuell anpassbar.
- Das Pyrometer kann durch das Lösen einer Mutter vollständig aus dem Gehäuse entfernt werden, dies ermöglicht das schnelle Wechseln des Schutzglases direkt in der Vakuumkammer.
- Die Handhabung und Anpassungen der Motordrehzahl ist unkompliziert und auch mittels USB-Schnittstelle von einem Computer aus kontrollierbar.

Des Weiteren ermöglicht die kompakte Bauform auch eine Positionierung in komplizierten Einbausituation, z.B. wie bei zukünftig geplanten Schweißversuchen mit großen Verfahrensweg des Maschinentisches zur Herstellung großvolumiger AM-Strukturen.

5.2 Temperaturentwicklung in mehrlagig hergestellten AM Strukturen

Zur Erprobung des gesamten Pyrometerschutz-Apparatur wurden im Anschluss an die Emissionsgradbestimmung mehrere AM-Strukturen aufgebaut. Ziel dieser Versuche bestand in der

Bestimmung einer Abhängigkeit der Spitztemperatur von der Lagenanzahl und dem Aufzeigen von einem unterschiedlichen Abkühlverhalten. Eine weitere durchgeführte Versuchsreihe ging speziell auf das Thema von Veränderungen der $t_{8/5}$ -Zeit bei verschiedenen angewendeten Abkühlstrategien ein. Hierzu muss aber gleich zu Beginn erwähnt werden, dass diese Verläufe nur Tendenzen angeben und keine exakten Temperaturentwicklungen widerspiegeln, weshalb auch selten Temperaturwerte genannt werden. Aufgrund der Messtoleranz des Pyrometers sowie dem experimentell bestimmten konstanten Emissionskoeffizienten kann nicht davon ausgegangen werden, dass der reale exakte Wert widerspiegelt wird. Der Messabstand zwischen Pyrometermessfleck und Schweißpunkt wurde manuell eingestellt und unterliegt trotz aufwendiger Bemühungen einer gewissen Toleranz. Deshalb wurde der wirkliche Messabstand aus den Messdaten berechnet und in den nachfolgenden Grafiken (siehe Abbildung 52, Abbildung 54 und Abbildung 57) berücksichtigt und eingearbeitet. Diese Abweichungen vom Soll konnten mitunter mehrere Millimeter betragen und wirkte sich auf die gemessenen Werte und somit denn einzelnen Messkurven merklich aus. Zur besseren Vergleichbarkeit der Temperaturentwicklungen wurden die einzelnen Temperaturgefälle jeder Lage berechnet. Dabei wurde die Temperaturdifferenz durch die Messabstandsdifferenz gerechnet um ein Temperaturgefälle von °C pro mm zu erhalten. Die Temperaturdifferenz wurde durch den Unterschied der höchsten gemessenen zur niedrigsten gemessenen Temperatur ermittelt. Zur Berechnung des Messabstandes wurden die Differenz der größten und kleinsten wahren berechneten Distanz herangezogen.

5.2.1 „Single-Wall“ Struktur

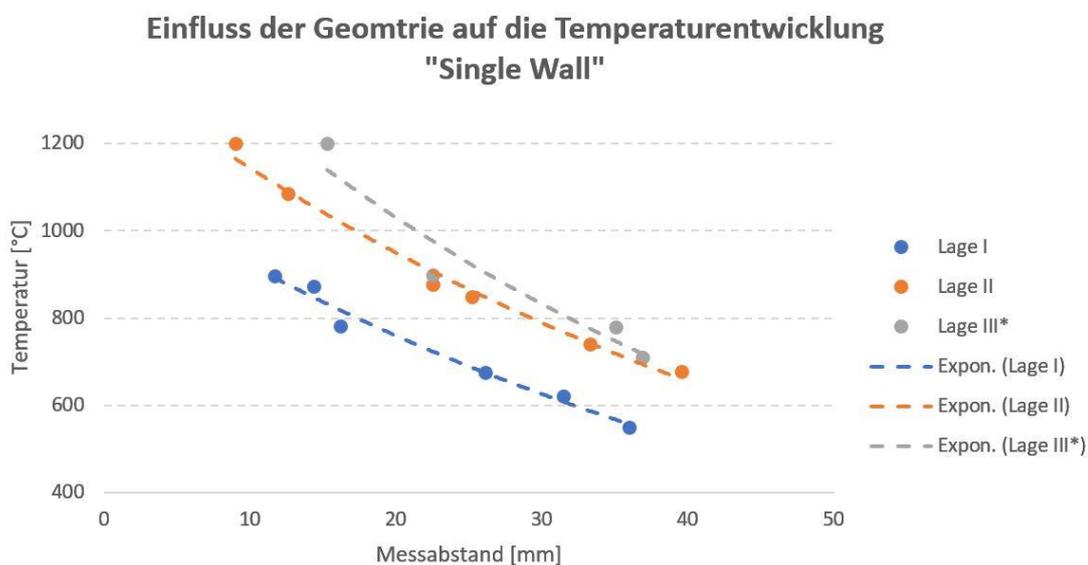


Abbildung 52: Temperaturentwicklung der AM Struktur „Single-Wall“ mit den berechneten wahren Messabstand zwischen Strahlzentrum und Messfleck (mit * gekennzeichnete Lage war fehlerhaft)

Aufgrund des aufgetretenen „humping“ Effektes, welcher ab der dritten Schweißlage sichtbar wurde wird im Folgenden eine Begründung für das Auftreten der Anomalie gesucht. Eine erste Betrachtung der Werte liefert bereits sehr interessante Ergebnisse:

- Die dargestellte Temperaturentwicklung mit zunehmenden relativen Abstand zum Strahlzentrum der gesamten ersten Lage verlief recht gleichmäßig bis auf eine Ausnahme bei ca. 14mm und entspricht einem durchschnittlichen Temperaturgradienten von ca. $14^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ (flache Entwicklung). Eine Spitzentemperatur von unter 900°C in einem Abstand von lediglich ca. 12mm nach dem Schweißpunkt spricht für eine äußerst gute Wärmeableitung in die Substratplatte und war bei der ersten Lage auch nicht anders zu erwarten. Die nachfolgenden Abstände lieferten ebenfalls sehr moderate und annähernd gleichmäßig fallende Temperaturwerte bis um die 550°C bei ca. 36mm Abstand.
- Der durchschnittliche Temperaturgradient bei der gesamten zweiten Lage beträgt ca. $15^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ und weist damit einen beinahe gleichen Temperaturabfall zur vorhergehenden Lage auf (flache Entwicklung). Die Verbindung zwischen dem ersten Messpunkt bei 9mm und dem zweiten Messpunkt von ca. 12mm wurde strichliert dargestellt weil die Oberflächentemperatur bei 9mm die obere Messgrenze von 1200°C überschritten hat. Der Temperaturgradient in diesem Abschnitt kann nicht eindeutig bestimmt werden. Der restliche Verlauf zeigt keine weiteren Unregelmäßigkeiten und endete mit Werten um die 680°C bei 36mm Messdistanz. Der eindeutige Unterschied zur ersten Lage besteht im höheren Temperaturniveau, was auf den geometrischen Einfluss der vorhergehenden Lage zurückgeführt wird. Die Fähigkeit des Transports an Wärmeenergie scheint bereits deutlich vermindert zu sein. Ein Einfluss durch eine eventuelle Vorwärmung der Substratplatte wird ausgeschlossen, da ja das Bauteil vor jedem neuen Schweißprozess auf Raumtemperatur auskühlen konnte. Die optische Begutachtung der zweiten Lage förderte keinerlei sichtbare Unregelmäßigkeiten zu tage, obwohl die Temperaturentwicklung (siehe Abbildung 37) bereits eine gewisse Fehlentwicklung (kein stabiler Temperaturverlauf mehr gegeben stattdessen kommt es bereits zur Ausbildung von Hügeln und Tälern im Temperaturverlauf) vermuten lässt. Diese Tatsache deutet darauf hin, dass die tatsächliche Ausbildung des späteren „humping“ Effekts bereits frühzeitig hier (in der Temperaturbeobachtung) erkannt werden kann.
- Die Interpretation der Ergebnisse der dritten Lage erfolgt unter Vorbehalt. Aufgrund der unzureichenden Schweißung sind auch die gemessenen Oberflächentemperaturen mit Vorsicht zu betrachten und womöglich nicht repräsentativ, weshalb die gesamte Kurve punktiert dargestellt wurde. Die ersten zwei Messwerte bei 12 und 13mm wurden gar nicht angeführt weil sie wie bei ca. 16mm über 1200°C lagen. Im Gegensatz zur vorhergehenden Lage passen hier optisches Ergebnis und gemessene Unregelmäßigkeit (Vergleiche Abbildung 37 und Abbildung 39 a.) zusammen. Die Übereinstimmung zwischen optischer Realität (Hügel und Täler im Schweißbild) stimmen sogar fast ident mit der gemessenen Temperaturentwicklung (Hügel und Täler im Temperaturverlauf) überein. So scheinen die Spitzentemperaturen im Temperaturverlauf genau dort gemessen worden zu sein wo auch im Aufbau eine Strukturspitze erreicht wurde. Dies lässt den Rückschluss zu, dass in den optischen Hügeln das heiße Schmelzbad ange-

häuft wurde und in den optischen Tälern sich nur wenig Material halten konnte (passend zur „humping“ Theorie, die ja eine unkontrollierte Schmelzbadbewegung als Ursache beschreibt).

Die Ergebnisse weisen auf einen Anstieg der Oberflächentemperatur mit steigender Lagenanzahl hin. Dieser Effekt wird auf die schlanke Aufbaustruktur der Geometrie und die damit verbundene Verschlechterung der Wärmeableitung zurückgeführt.

Als eine Ursache für den „*humping*“-Effekt, welcher einen unerwünschten Rückfluss bzw. eine unkontrollierte Bewegung von geschmolzenem Material innerhalb des Schweißbades darstellt, führen verschiedene Literaturquellen eine zu hohe Schweißgeschwindigkeit als Hauptursache an. In Kombination mit einer großen Oberflächenspannung des geschmolzenen Materials führt die Überschreitung einer kritischen Schweißgeschwindigkeit zur zyklischen Ausbildung von Hügeln und Tälern entlang der Schweißnaht. Dieser Effekt ist bei anderen Schweißverfahren, wie z.B. beim Schutzgasschweißen, zusätzlich zur Änderung der Schweißgeschwindigkeit als auch durch Veränderung der Schweißposition oder der Schutzgaszusammensetzung unterdrückt worden [44] [45] [46]. In Bezug auf die EBW-Fertigung lassen sich aber solche Maßnahmen nicht (z.B. Änderung der Schutzgaszusammensetzung) bzw. schwer (z.B. Änderung der Schweißposition) umsetzen. Eine gute Möglichkeit bittet jedoch die Kombination aus veränderlicher Schweißgeschwindigkeit und thermischer Kontrolle. So könnten eventuelle Schweißfehler (z.B. *humping*) bei schwierigen Bauteilgeometrien (z.B. dünne Wandaufbauten) bereits frühzeitig detektiert werden (auffällige Schwingungen im Temperaturverlauf) und die Schweißparameter (Geschwindigkeit, Strom, Drahtförderung, etc.) könnten rechtzeitig adaptiert und angepasst werden.

Für die Versuchsreihe „Single-Wall“ scheint neben dem Faktor der Schweißgeschwindigkeit auch die schlechte Wärmeableitung einen großen Einfluss auf die Ausprägung des „*humping*“-Effekts zu besitzen. In der ersten Lage wurden im Temperaturprofil als auch optisch keinerlei Anzeichen für einen schlechten Energietransport detektiert. In der zweiten und dritten Lage scheint jedoch die Temperaturentwicklung und Wärmeableitung kritisch zu sein, was auch in Abbildung 53 im gesteigertem Temperaturniveau, welches direkt nach dem Schweißvorgang aufgezeichnet wurde, deutlich sichtbar wird. Die zweite Lage zeigt deutlich den Einfluss der Geometrie auf den Energietransport, da im Vakuum die Energie zu einem großen Teil nur durch Wärmetransport abgeführt werden kann bei immer höheren Temperaturen immer stärker. Der Grund liegt in der vierten Potenz der Strahlungsleistung liefert dieses Ergebnis einen deutlichen Hinweis auf die „Flaschenhalsbildung“ der Geometrie bzgl. des Energietransportes. Die Temperaturentwicklung der dritten Lage ist in diesem Zusammenhang kaum aussagekräftig, da sowohl optisch als auch thermisch sich der Messfleck des Pyrometers (bei einem Abstand von 10mm) sich in einem Tal befand.

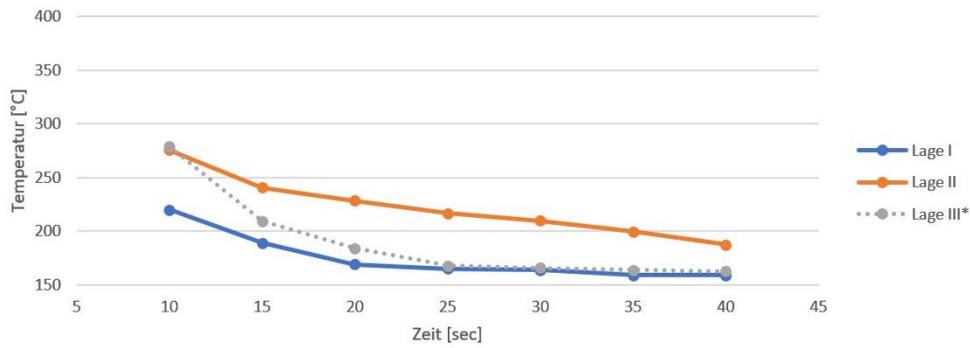


Abbildung 53: Zwischenlagentemperatur für die AM Struktur "Single-Wall" 10 bis 40 Sekunden nach Schweißprozess

5.2.2 „Double-Wall“ Struktur

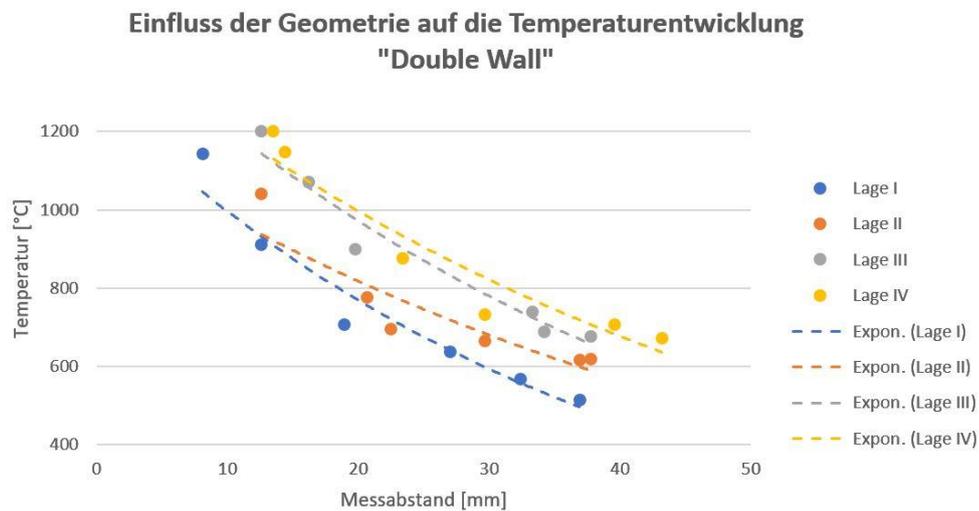


Abbildung 54: Temperaturentwicklung der AM Struktur Double-Wall mit den berechneten wahren Messabstand zwischen Strahlzentrum und Messfleck

Zur Auswertung der AM-Struktur „Double-Wall“ wurden als Bezugspunkte die erreichten quasi stationären Temperaturen der heißeren ersten Spur jeder Lage und der verschiedenen relativen Abstände zum Strahlzentrum herangezogen.

Eine Betrachtung der Ergebnisse liefert folgende Erkenntnisse:

- Einen gleichmäßigen Temperaturverlauf lieferte die Lage I mit einem durchschnittlichen Temperaturgradienten von 22°C/mm über den gesamten Temperaturverlauf und weist im Vergleich mit der „Single-Wall“ schon auf einen deutlich steileren Temperaturabfall auf.

- Auch die zweite Lage mit einem durchschnittlichen Temperaturgradienten von $17^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ weist auf eine schnellere Abkühlung und engeres Temperaturfeld als im Vergleich zu der „Single-Wall“ hin. Zusätzlich fällt auch auf, dass bei dem zweizeiligen Aufbau in der ersten und zweiten Lage die Messobergrenze von 1.200°C nicht erreicht wurde. Mit steigender Distanz kommt es zu einer immer größeren Abflachung der Temperaturentwicklung, ein Anzeichen für einen schlechteren Energietransport der zweiten Lage (siehe Abbildung 56) mit immer weiteren Isothermen).
- Der erste Messpunkt der dritten Lage besitzt eine Temperatur über 1.200°C und wurde daher strichliert ausgeführt. Die Auswertung zeigte, dass für die nominellen 25mm und 30mm tatsächlich ca. 33mm und ca. 34mm Abstand gemessen wurde. Die Messpunkte liegen daher unmittelbar nebeneinander und weisen einen gemessenen Temperaturunterschied von knapp 50°C auf, dies führt optisch zu einem merklichen Knick im Verlauf. Dieser relativ große Temperatursprung innerhalb dieser geringen Distanz, könnte sich aus einer Schweißunregelmäßigkeit (z.B. Bildung einer Pore, optisch nicht sichtbarer „humping“ Effekt wie bei der zweiten Lage in der Single-Wall Struktur oder durch Drahtförderunregelmäßigkeiten) sowie eventuellen transversale Positionierungsfehlern des Pyrometermessflecks herausgebildet haben.
- Gleich wie bei der dritten Lage wies auch der erste Messwert der vierten Lage eine Überschreitung der Messgrenze auf und wurde strichliert verbunden. Eine Abflachung des Temperaturprofils gleich wie bei der zweiten und dritten Schweißlage bei ca. 700°C konnte festgestellt werden. Der gesamte Verlauf spiegelt aber das stabile und gleichmäßige Zustandekommen der Schweißlage wieder. Der durchschnittliche Temperaturgradient lag hier bei ca. 17°C pro Millimeter über den gesamten Temperaturverlauf.

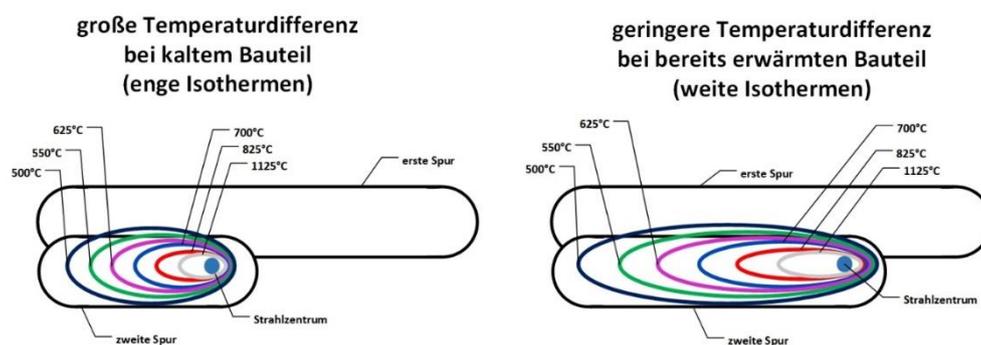


Abbildung 55: schematische Ausbildung der Isothermen bei der Double-Wall Struktur mit Unterscheidung in Bauteiltemperatur

Generell deuten auch diese Temperaturverläufe auf einen Anstieg der Oberflächentemperatur mit steigender Lagenanzahl durch die geänderten Geometrieverhältnisse hin. Wie bereits in Kapitel 4 festgestellt wurde, erhöht der zweizeilige Aufbau durch seine Nahtüberlappung (vergrößerte Oberfläche und benachbartes Volumen) die Fähigkeit Wärme an die Substratplatte abgeben zu können. Dieser Umstand wird durch das Messergebnis insofern bestätigt, dass im

Vergleich zur Single-Wall Struktur die Messgrenze erst in der dritten Lage erreicht wurde. Ein weiterer beobachteter Effekt ist eine Abflachung des Temperaturgradienten mit steigendem Messabstand. Ab einer Distanz von ca. 20 - 25mm bzw. bei Temperaturen um die 700°C scheint die verbleibende Restwärme im erzeugten Bauteil langsamer abtransportiert werden zu können und der Temperaturgradienten flacht ab. Dieser Effekt wird auch in Abbildung 56 deutlich sichtbar, ab ca. 30 Sekunden nach dem Ende der Schweißung verlaufen die Temperaturentwicklungen aller Lagen sehr flach und praktisch synchron (die erste Lage um ca. 25°C kühler als die anderen). Diese beiden Umstände deuten darauf hin, dass mit zunehmender Dauer (der größere Messabstand bedeutet ebenfalls mehr Zeit) sich das Bauteil thermisch immer mehr im Gleichgewicht befindet und sich daher die Temperaturdifferenz innerhalb des Bauteils bereits zu weiten Teilen ausgeglichen hat. Damit werden auch die Abstände zwischen den einzelnen Isothermen immer größer (siehe Abbildung 55).

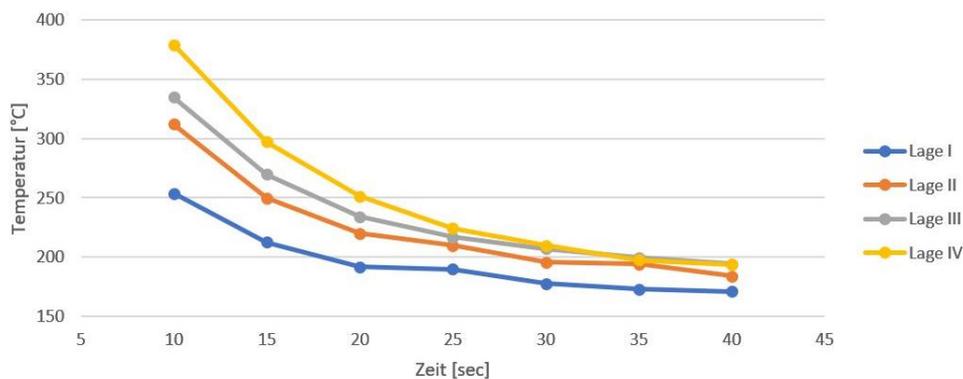


Abbildung 56: Zwischenlagentemperatur für die AM Struktur "Double-Wall" 10 bis 40 Sekunden nach Schweißprozess

5.2.3 „Block“ Struktur

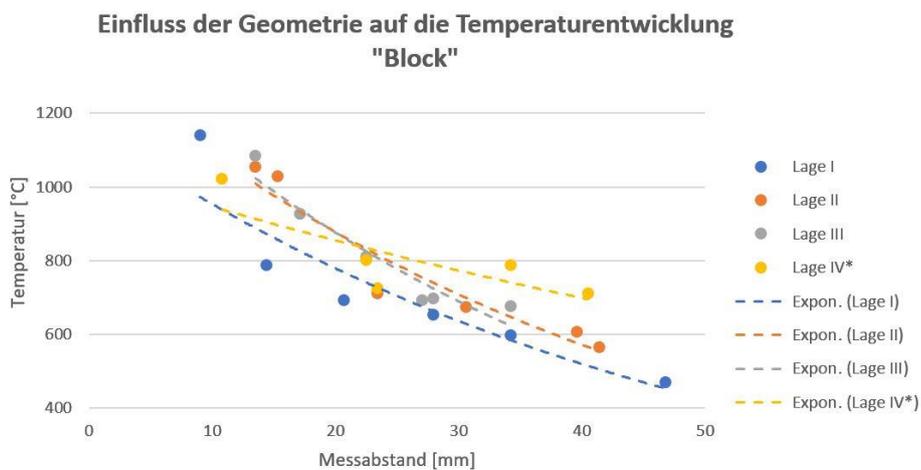


Abbildung 57: Temperaturentwicklung der AM Struktur Multi Wall mit den berechneten wahren Messabstand zwischen Strahlzentrum und Messfleck (mit * gekennzeichnete Lage war fehlerhaft)

Um eine möglichst gute Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Lagen gewährleisten zu können wurde zur Auswertung dieser Versuchsreihe jeweils die Spitzentemperatur der dritten Spur verwendet.

Eine Betrachtung der Ergebnisse liefert folgende Erkenntnisse:

- Die erste Lage liefert eine relativ gleichmäßige Temperaturentwicklung mit einem Gradienten von $25^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ über den gesamten Temperaturverlauf. Wie auch schon bei der Auswertung der „Double-Wall“ Versuche beobachtet kommt es auch hier bei einer Temperatur ab ca. 700°C zu einer Abflachung des Temperaturgradienten.
- Ebenfalls wie bei der AM-Struktur „Double-Wall“ kommt es zu relativ niedrigeren gemessenen Oberflächentemperaturen im Vergleich zur „Single Wall“ (bei 13,5mm sind es gemessene 1054°C). Dieser Umstand deutet auf eine bessere Wärmeableitung in Folge der vergrößerten Oberfläche hin. Der weitere Verlauf der zweiten Lage nähert sich dann dem Ergebnis der ersten Lage an und besitzt ebenfalls bei 700°C eine Abflachung im Verlauf.
- Die Oberflächentemperatur der dritten Lage verläuft, bis auf einen Ausreißer bei ca. 22,5mm, praktisch ident zum Temperaturprofil der vorhergehenden zweiten Lage. Dieser Umstand deutet darauf hin, dass der limitierende Einfluss der Geometrie („Flaschenhalsbildung“ für den Energietransport) bei mehrzeiligen Aufbauten (in diesem Fall fünf Spuren) ausgemerzt wird
- Aufgrund des ungenügenden Schweißergebnisses (siehe Kapitel 3) der vierten Lage wurde das Ergebnis strichliert dargestellt. Aufgrund der fehlerhaften Schweißungen sind auch die gemessenen Oberflächentemperaturen mit größter Wahrscheinlichkeit nicht sehr aussagekräftig und repräsentativ, hierfür sprechen unter anderem der un-stete Verlauf des Temperaturgradienten sowie dessen ungleichmäßiger Verlauf.

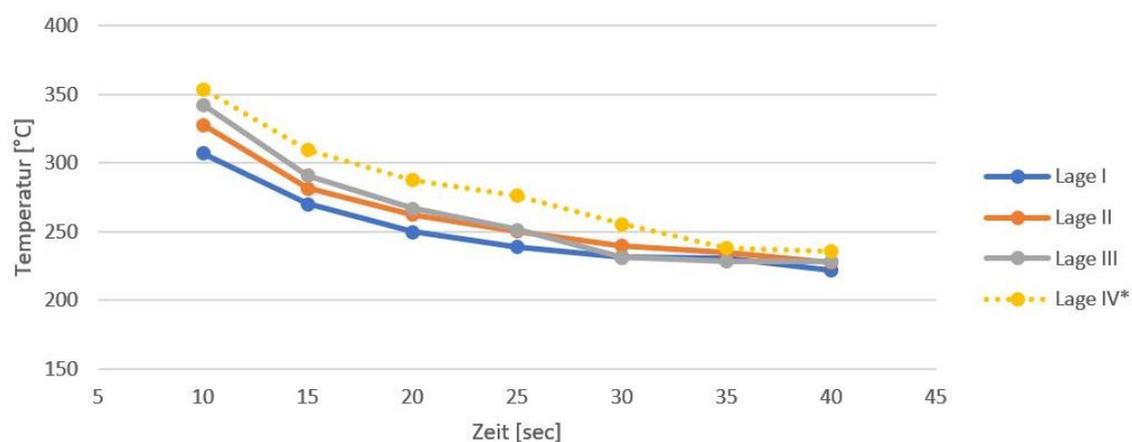


Abbildung 58: Zwischenlagentemperatur für die AM Struktur "Block" 10 bis 40 Sekunden nach Schweißprozess

Der sehr gleichmäßigen Verlauf der Zwischenlagentemperatur (siehe Abbildung 58) und die Temperaturergebnissen der zweiten und dritten Lage deuten auf eine sehr gute Wärmeleitung innerhalb der gewählten Struktur hin. Die Zwischenlagentemperatur bei den ersten drei Lagen sind praktisch synchron (die vierte Lage ist in diesem Zusammenhang aufgrund des ungenügenden Schweißergebnisses außenvor zu lassen) und erreichen bereits nach 30 Sekunden eine Temperatur unter 250°C.

5.2.4 Erkenntnisse aus der Untersuchung des Einflusses der Geometrie auf den Energietransport

Zusammenfassend lässt sich für alle drei AM-Strukturen ein eindeutiger Einfluss der Geometrie auf die Temperaturentwicklung ablesen. Dieser Umstand zeigt sich deutlich in den Unterschieden zwischen „Single-Wall“ & „Double-Wall“ sowie den „Block“ Versuchen. Durch die merklich lagenweise gesteigerte quasi stationäre Temperatur für die verschiedenen gemessenen Abstände bei den ersten beiden Versuchsreihen zeigt sicher der deutliche Einfluss der geometrischen Limitierung auf die Wärmeleitung. In der schlanken Wandstruktur („Single Wall“- und auch noch zum Teil bei den „Double Wall“ Aufbauten) kann die Wärmeleitung anscheinend nur in 2D erfolgen. Eine erste Annahme war die Vermutung, dass die Lagentemperatur durch die größere Menge an aufgebracht Volumen beim „Block“ Versuch deutlich steigen müsste. Dies wurde aber anscheinend durch die bessere dreidimensionale Wärmeableitung sowie dem größeren Volumen und dem damit verbundenen besseren Energietransport unterbunden. Der Einfluss des größeren Volumens wird aber beim Vergleich der Zwischenlagentemperatur deutlich, so zeigen „Single-Wall“ & „Double-Wall“ Versuch nach 40 Sekunden eine Zwischenlagentemperatur von unter 200°C was im „Block“ Versuch mit ca. 225°C nicht gelang.

5.2.5 Einfluss der Abkühlstrategie auf das Schweißergebnis

Eine weitere Fragestellung die im Zuge dieser Arbeit geklärt werden sollte ist der Einfluss der veränderten Prozesszykluszeit und Abkühlstrategie auf die Veränderung einer charakteristischen Abkühlzeit (z.B. $t_{8/5}$). Zu diesem Zweck wurde einmal mit Kammerfluten und damit verbundener Konvektion das additiv gefertigte Bauteils auf Raumtemperatur vor jeder neuen Lage abgekühlt, und ein zweites Mal mit einer konstanten Verweilzeit von 10min im Vakuum zwischen den Lagen geschweißt. Auf Basis dieser Ergebnisse soll die bisher verwendete Abkühlstrategie mit konstanter Verweilzeit zur Fertigung von mehrlagigen Bauteilen bewertet werden und dem Idealfall eines „kühlen“ Bauteils gegenüber gestellt werden. Wie die Ergebnisse der Emissionsgradbestimmung aufgezeigt haben lassen sich die Zwischenlagentemperaturen mit einem vergleichsweisen geringem Fehler bestimmen. Wie bereits festgestellt wurde ist der relative Fehler zwischen tatsächlicher und gemessener Oberflächentemperatur bei langsamen Temperaturänderungen (z.B. beim Abkühlen im Vakuum) mit einem vertretbaren Rahmen von 1 bis 4% sehr moderat.

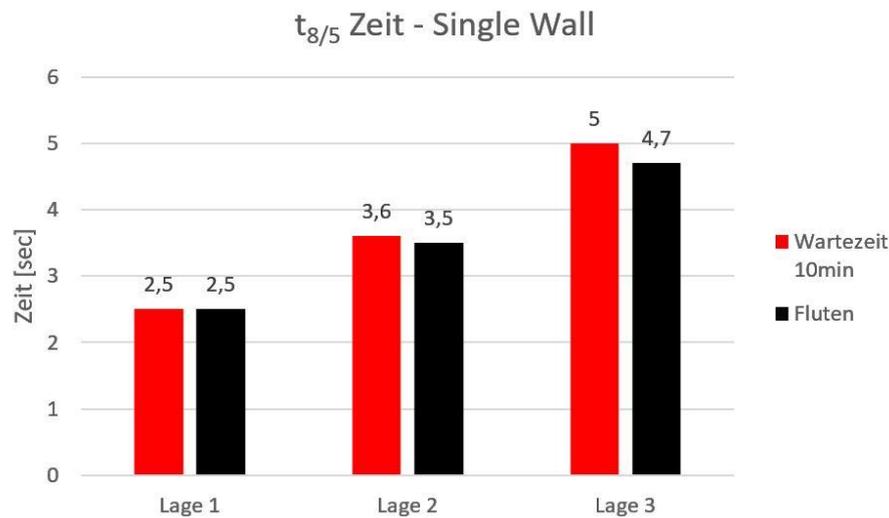


Abbildung 59: Charakteristische $t_{8/5}$ Zeit für die beiden verwendeten Abkühlstrategien zum Aufbau einer AM-Struktur „Single-Wall“ Abkühlverhalten Single-Wall

In Abbildung 59 ist die charakteristische Abkühlzeit $t_{8/5}$ der AM-Struktur „Single-Wall“ je Lage für die beiden verwendeten Abkühlstrategien dargestellt. Es zeigt sich eine marginale Zunahme der $t_{8/5}$ -Zeit ab der zweiten Schweißlage. Diese begrenzte Steigerung, zwischen den einzelnen Lagen, spricht für eine geringe eingebrachte Wärmemenge und stimmt mit dem eingebrachten Schweißvolumen bei einem einzeiligen Lagenaufbau überein. Bemerkenswert ist die Tatsache, dass zwischen den beiden Abkühlstrategien es zu beinahe keinerlei Zeitverschiebung kommt. Dies spricht dafür, dass das Abkühlverhalten unabhängig von der Strategie zu einem überragenden Teil von der Geometrie und dem damit verbundenen Wärmestau abhängig ist. Eine Folgerung könnte sein, dass bei sehr dünnwandigen Bauteilen (z.B. Single Wall) die Wartezeit zwischen den Schweißzyklen eher zu vernachlässigen ist, viel mehr sollte die Strahlleistung mittels integrierter Parameterregelung direkt im Schweißprozess an die Temperaturegebenheiten in der additiv erzeugten Struktur angepasst werden. Durch das Anpassen der eingebrachten Energiemenge sollten Schweißfehler wie „humping“ unterdrückt werden können.

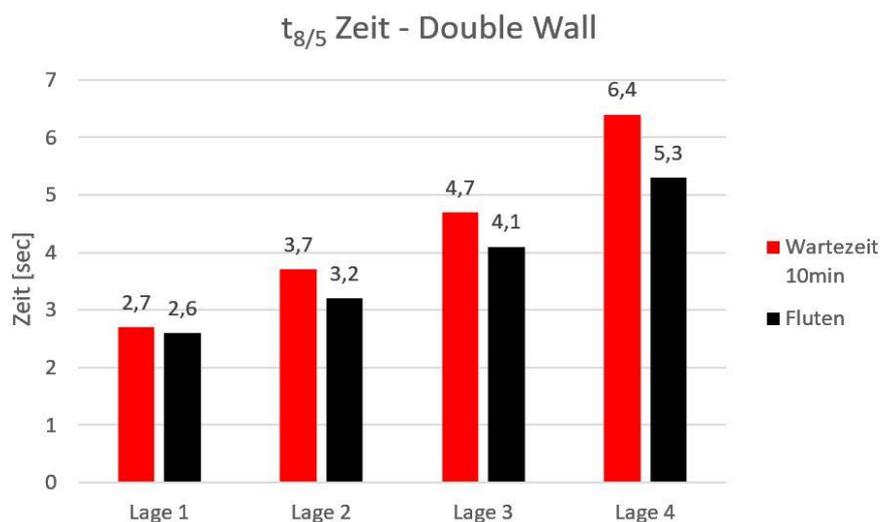


Abbildung 60: Charakteristische $t_{8/5}$ Zeit für die beiden verwendeten Abkühlstrategien zum Aufbau einer AM-Struktur „Double-Wall“

Wie bereits in Kapitel 4 erwähnt wurde, ist bei der Interpretation der „Double-Wall“ Ergebnisse (siehe Abbildung 60) auf den Positionierungsfehler des Pyrometermessflecks zu achten und deshalb wurden nur die Ergebnisse der ersten Schweißraupe für jede Lage gegenübergestellt. Die Auswertung zeigt, dass im Gegensatz zum „Single-Wall“ Versuch eine deutliche Zunahme der $t_{8/5}$ -Zeit beim Abkühlen im Vakuum erfolgt. Dieser gemessene Effekt wird der im Bauteil höheren gespeicherten Restwärme, die im Vakuum nur per Strahlung reduziert werden kann, zugeschrieben. Da die Wärmestrahlung mit der vierten Potenz der Temperatur abgegeben wird (Formel siehe Kapitel 2), sinkt die maximale Strahlleistung bei geringeren Temperaturen (gemessene Zwischenlagentemperatur nach 40 Sekunden war unter 200°C) im Vergleich zur Schmelzbadtemperatur (über 1200°C) deutlich ab. Im Vergleich zur einzeiligen „Single-Wall“ Struktur kommt es hier bereits zu ersten Unterschieden zwischen den Abkühlstrategien. Diese Veränderung wird der größeren Anbindefläche zum Wärmetransport sowie dem größeren Volumen an Schweißmaterial zugerechnet. So kommt es in der vierten Lage zu einer 20%tigen Zeitdifferenz zwischen dem abgekühlten und noch durch fehlende Konvektion vorgewärmten Bauteil.

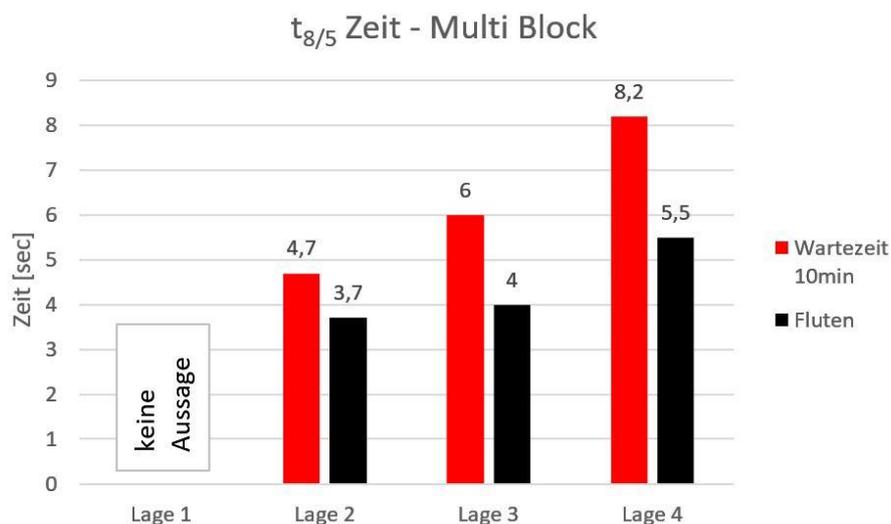


Abbildung 61: Charakteristische $t_{8/5}$ Zeit für die beiden verwendeten Abkühlstrategien zum Aufbau einer AM-Struktur „Block“

Den signifikanten Einfluss der im Bauteil verbleibenden Restwärme veranschaulicht die Auswertung der AM-Struktur „Block“ (siehe Abbildung 61). Da nicht alle Messkurven die erforderliche Temperaturspitze von 800°C erreicht haben, konnte bei der ersten Schweißlage keine Berechnung durchgeführt werden bei allen übrigen Lagen diente die fünfte Schweißraupe als Bezug um die unterschiedlichen Abkühlzeiten aufzeigen zu können. Bereits die zweite Lage zeigt eine 30% Steigerung der $t_{8/5}$ -Zeit zwischen den beiden Abkühlstrategien. Dieser Trend verstärkt sich mit zunehmender Lagenzahl und liefert bei der vierten Lage eine Steigerung von ca. 50%. Diese stetige Steigerung wird gleich wie bei der „Double-Wall“ Versuchsreihe dem deutlich größeren eingebrachten Volumen und damit verbundenen höheren Zwischenlagentemperaturen zugeschrieben. Der Vergleich der Zwischenlagentemperaturen (Vergleiche Abbildung 53, Abbildung 56 und Abbildung 58) zeigt diese Zunahme an Temperatur und Volumen

deutlich an. Wie bereits festgestellt wurde kann zwar die Spitzentemperatur durch eine bessere Wärmeleitung (3D) rasch gesenkt werden aber der Einfluss an größerem Schweißvolumen führt unweigerlich zu längeren Kühlraten, was bei großvolumigen Bauteilkonstruktionen in der AM-Fertigung zu erheblichen Problemen führen kann (z.B. zu lange Wartezeiten zwischen den einzelnen Lagen).

6 Zusammenfassung

Der Einsatz des Pyrometers als Temperaturkontrolle in der AM-Fertigung wird durch den entwickelten Schutzmechanismus nun an der TU Graz ermöglicht. Bei den ersten Versuchsreihen wurden wichtige Informationen über Stärken und mögliche Verbesserungsgebiete gesammelt. So konnte unter anderem gezeigt werden, dass ein unerwünschtes Beschlagen des Pyrometerobjektives erfolgreich verhindert werden kann. Bei der Bestimmung eines möglichen Emissionskoeffizienten wurde der Zusammenhang von großen relativem Fehler und starken Temperaturveränderungen aufgezeigt, so lässt sich bei relativ langsamen Temperaturänderungen (Abkühlen nur über Strahlung und Wärmeleitung) eine Oberflächentemperatur derzeit mit relativ geringer Abweichung (unter 5%) bestimmen. Bei besser ausgewähltem Emissionsgrad sinkt dieser Fehler freilich noch deutlicher ab. Ein weiteres aufgezeigtes Problem war die Positionierung des Messfleckes. Abweichungen von über 5mm waren keine Seltenheit und bedeuten bei schmalen Schweißraupen (Breite 6mm) in Verbindung mit einer Messfleckgröße von ca. 2mm eine unzureichende Aussagekraft der Temperaturegebnisse, z.B. mögliches Mitmessen von unbeteiligten Strukturen kann nicht ausgeschlossen werden. In diesem Punkten ist eine Verbesserung der bisherigen angewendeten Strategie sicherlich für die Zukunft notwendig.

Die gesammelten Informationen über die Auswirkungen der Geometrie auf die Temperaturentwicklung haben zum Teil sehr eindeutige Ergebnisse gebracht. So wirkt ein schmaler (einzeiliger) Aufbau sehr negativ auf den Energiefluss, die Schweißwärme kann bereits ab der zweiten Lage nur mehr eingeschränkt an das Volumen der Substratplatte abgegeben werden. Gründe für dieses Verhalten sind unter anderem die, im Vergleich zu mehrspurigen Bauteilen, schlechtere, zwei dimensionale Wärmeleitung sowie das geringe Volumen unterhalb der neuen Schweißlage was offensichtlich zu einem Wärmestau innerhalb der schmalen AM-Struktur führt. Signifikante Auswirkung dieses Wärmestaus war das wiederholte Auftreten des „humping“ Effektes in den einspurigen Aufbauten.

Mit zunehmender Raupenanzahl steigt auch die Fähigkeit die Wärme effektiv vom Schweißpunkt abtransportieren zu können, so reicht bereits das Vorhandensein einer zweiten Spur um die negativen Einflüsse der ungünstigen zweidimensionalen Wärmeleitung überwinden zu können und Schweißfehler (wie z.B. die Ausbildung von Hügeln und Täler im Schweißbild) werden vollständig unterdrückt. Mit zunehmender Raupenanzahl (in diesem Fall fünf Spuren) werden die positiven Eigenschaften (wie z.B. gleichmäßige Wärmeableitung) eines verbesserten drei dimensional Energie transportes noch weiter ausgebaut.

Bei der Bewertung der effektiveren Abkühlstrategie zeigte sich der Einfluss des Schweißvolumens bzw. der Geometrie am deutlichsten. Bei einspurigen Aufbauten ändert sich aufgrund der geometrischen Gegebenheiten an die Abkühlzeit von 800° auf 500°C praktisch gar nichts. Erst mit steigendem Volumen (mehrspuriger Aufbau) zeigen sich deutliche Unterschiede in der Temperaturentwicklung. So verlängert sich die $t_{8/5}$ Zeit bei großvolumigen Bauteilen mit steigender Lagenanzahl deutlich (vierte Lage 50%). Aus wirtschaftlichen Gründen wird es aber kaum möglich sein jede Lage komplett auf RT abkühlen lassen zu können, vielmehr sollten hier weitere Versuche vorgenommen werden, welche ein mögliches Optimum zwischen Zwischenlagentemperatur und Schweißergebnis aufzeigen können.

7 Ausblick

Die erfolgreich entwickelte und getestete Schutzvorrichtung lieferte erste wichtige Erkenntnisse über Temperaturverteilung, Einfluss der Geometrie auf Temperaturentwicklung sowie der Auswirkung unterschiedlicher Abkühlstrategien auf das Abkühlverhalten additiv gefertigter Strukturen via Elektronenstrahl. So konnte festgestellt werden, dass sich der „humping“ Effekt bei schmalen Wandstrukturen (z.B. Single Wall) bereits bei der Temperaturmessung der Vorgängerlage durch beinahe periodische Temperaturschwankungen detektieren lässt. Dieser Umstand ermöglicht den Einsatz einer temperaturabhängigen integrierten Prozesssteuerung um die tatsächliche Entstehung eines Schweißfehlers (wie z.B. des „humpings“) in der Folgelage verhindern zu können.

Die Erprobungsphase hat aber auch bereits Verbesserungsmöglichkeiten an der Messmethodik sowie der bestehenden Konstruktion aufgezeigt.

Die Festlegung der Drahtspitze als Referenzpunkt zur Positionierung des Pyrometermessflecks hat sich als unzureichend erwiesen. Eine mögliche Abhilfe könnte ein mittels Elektronenstrahl produzierter Referenzpunkt an der Oberfläche der Substratplatte sein, an diesem Punkt kann der Messfleck des Pyrometers nach der jeder Schweißung neu und relativ genau ausgerichtet werden.-

Die Messapparatur wurde bei den bisherigen Versuchsreihen nur bei recht kurzen Fertigungszeiten verwendet und war keiner Dauerstrahlbelastung ausgesetzt. Aufgrund der großen Leistungsfähigkeit der Elektronenstrahlanlage können aber auch Bauteile mit deutlich größeren Dimensionen (bis zu 200mm Einschweißtiefe) verschweißt bzw. erzeugt werden. Um auch bei solchen Bedienung eine kontaktlose Temperaturmessung durchzuführen ist ein Schutz der Antriebseinheit vor starker Wärmestrahlung unumgänglich. Die Wicklung innerhalb des Motors sollte laut Herstellerangaben keiner Temperatur über 100°C ausgesetzt sein, da ansonsten mit einem Ausfall der Einheit zu rechnen sei. Dieser Umstand führte zu einer Überarbeitung (siehe Abbildung 62) des bestehenden Konzeptes bei der der Elektromotor samt Getriebe innerhalb der schützenden Gehäuseeinheit platziert wird. Diese Überarbeitung sollte auch dazu genutzt werden den gesamten Messprozess robuster zu gestalten und mögliche Fehlerquellen wie eine falsche Filmpatronenausrichtung, Pyrometermessfleckfehlstellung oder das Problem mit dem losen Kabelpaket innerhalb der Kammer auszumerzen. Das Einsatzspektrum der bestehenden Schutzvorrichtung inklusive Pyrometer kann noch auf viele weitere Anwendungsfelder ausgedehnt werden wie zum Beispiel:

- Validierung thermisch numerischer Simulationen von AM-Bauteilen durch kontaktlose Temperaturmessung
- In-situ Prozesskontrolle durch Überwachen der Schweiß- bzw. Zwischenlagentemperatur
- Monitoring von Abkühlzeiten bei kritischen Werkstoffen

ten der Stahlplatte zugeschrieben. Diese ersten vielversprechenden Versuche veranschaulichen deutlich die zusätzlichen Möglichkeiten der Inline-Kontrolle mittels kontaktloser Temperaturmessung und werden in nachfolgen Arbeiten noch vertiefend untersucht.

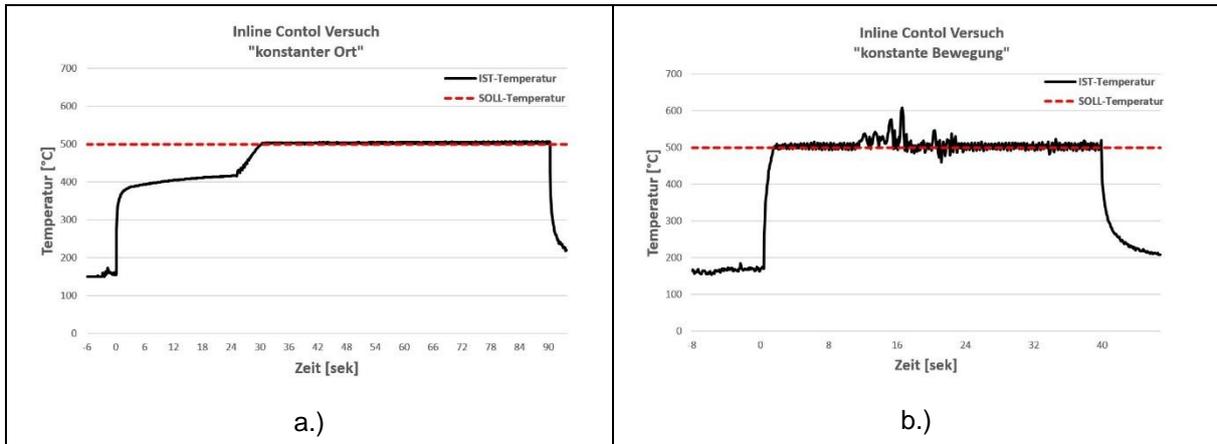


Abbildung 63: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Inline-Control Versuche a.) konstanter Ort und b.) mit konstanter Bewegung

Literaturverzeichnis

- [1] A. Middleton, "Wie die additive Fertigung die Welt der Produktion verändert," *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, vol. 119, pp. 82–85, 2017.
- [2] S. Kegelmann, "Voraussetzungen für die wirtschaftliche additive Fertigung," *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, vol. 120, pp. 78–81, 2018.
- [3] U. Zerbst and K. Hilgenberg, "Schadensentwicklung und Schadenstoleranz von SLM-gefertigten Strukturen," in *Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017, pp. 241–270.
- [4] M. Schmid, "Additive Fertigung mit Selektivem Lasersintern (SLS): Prozess- und Werkstoffüberblick," p. 31, 2015.
- [5] R. Lachmayer and R. B. L. Hrsg, *Additive Manufacturing Quantifiziert*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.
- [6] J. Fuchs, "Drahtbasierte additive Fertigung mit dem Elektronenstrahl und einer unlegierten Massivdrahtelektrode," Master Thesis, Technische Universität Graz, 2016.
- [7] P. R. Peter, "Drahtbasierte additive Fertigung von Ti6AlV4 mittels Elektronenstrahlschweißen," Master Thesis, Technische Universität Graz, 2017.
- [8] L. Wischenbart, "Kalibrierung eines Pyrometers in der Elektronenstrahlschweißanlage für kontinuierliche Temperaturmessung," Bachelor Thesis, Technische Universität Graz, 2018.
- [9] H.-J. Bargel and G. S. Hrsg, *Werkstoffkunde*, 12.Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018.
- [10] B. Arnold, *Werkstoffkunde für Wirtschaftsingenieure*, 2.Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.
- [11] M. Peters and H. Clemens, "Titan, Titanlegierungen und Titanaluminide – Basis für innovative Anwendungen," *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, vol. 155, no. 9, pp. 402–408, 2010.
- [12] G. Schulze, *Die Metallurgie des Schweißens*, 4.Auflage. Berlin Heidelberg: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2010.
- [13] H. E. F. Hrsg, *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*, 2.Auflage. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.
- [14] D. Greitemeier, *Untersuchung der Einflussparameter auf die mechanischen Eigenschaften von additiv gefertigtem TiAl6V4*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.
- [15] C. Ucke, T. Bürke, and R. Klanner, "Physik," *Biologie in Unserer Zeit*, vol. 28, no. 5. Springer Spektrum, Berlin Heidelberg, pp. X–XI, 2015.
- [16] P. Kurzweil and P. Scheipers, *Chemie - Grundlagen, Aufbauwissen, Anwendungen und Experimente*, 9.Auflage., vol. 53. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2012.
- [17] B. Plewinsky, M. Hennecke, and W. Oppermann, *Ingenieurwissen Chemie*. Berlin Heidelberg: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.
- [18] H. Sicius, *Vanadiumgruppe: Elemente der fünften Nebengruppe*. Dormagen: Springer Spektrum, 2016.
- [19] U. Dilthey and S. Fertigungsverfahren, *Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1*, 3.Auflage. Berlin Heidelberg New York, 2006.
- [20] H. J. Fahrenwaldt, V. Schuler, and T. Jürgen, *Praxiswissen Schweißtechnik.pdf*. 2014.
- [21] R. Förtser and A. Förster, *Einführung in die Fertigungstechnik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2018.
- [22] A. H. Fritz, J. Schmütz, and B. Wieneke-Toutaoui, *Urformen*, 11.Auflage. SpringerVieweg, 2015.
- [23] TWI Ltd (Head Office), "What is non-vacuum electron beam welding?," 2019. [Online]. Available: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-non-vacuum-electron-beam-welding>. [Accessed: 05-Jun-2019].
- [24] F. H. Bernhard, *Handbuch der Technischen Temperaturmessung*, 2.Auflage. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2014.

-
- [46] U. Gratzke, P. D. Kapadia, J. Dowden, J. Kroos, and G. Simon, "Theoretical Approach to The Humping Phenomenon in Welding Processes," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 25, no. 11, pp. 1640–1647, 1992.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Temperaturabhängige Kristallsystemumwandlung des Reinstoffes Titan in Anlehnung an [14] [15]	5
Abbildung 2: Kristallsystem vom Reinstoff Aluminium in Anlehnung an [15]	6
Abbildung 3: Temperaturabhängige Kristallsystemumwandlung von Ti-6Al-4V in Anlehnung an [15].....	8
Abbildung 4: DIN 8580 in Anlehnung an [20] [21]	9
Abbildung 5: Prinzipieller Aufbau einer Elektronenstrahlanlage in Anlehnung an [17] [20]....	10
Abbildung 6: Schematische Darstellung einer drahtbasierten additiven Schweißung mittels Elektronenstrahl in Anlehnung an [19].....	12
Abbildung 7: Energietransport über Systemgrenzen in Anlehnung an [28]	15
Abbildung 8: Spektrale Strahldichte eines Schwarzen Körpers als Funktion der Wellenlänge von [24]	19
Abbildung 9: Einteilung von Strahlungsthermometern entsprechend deren Wellenlängenbereichs [24]	19
Abbildung 10: Schematische Messanordnung mit strahlender Umgebung in Anlehnung an [24] [26].....	21
Abbildung 11: Schematischer Aufbau eines Thermoelements in Anlehnung an [24] [26].....	22
Abbildung 12: Elektronenschweißanlage Technische Universität Graz [32].....	24
Abbildung 13: Teilstrahlungs-pyrometer M318 mit charakteristischen Eigenschaften [33]	25
Abbildung 14: CAD Zeichnung der hergestellten Schutzvorrichtung	26
Abbildung 15: Vakuumtauglicher Gleichstrommotor DCX19SEBKL24V mit Planetenuntersetzung GPX22A (beide von der Firma „MaxonMotor“) sowie den passendem Stromversorgungsteckern und der selbst gefertigten Filmpatronenaufnahme	27
Abbildung 16: Pyrometerschutz und wichtige Bauteile.....	28
Abbildung 17: Schematische Darstellung von charakteristischen Strom-/Spannungszuständen der Antriebseinheit	31
Abbildung 18: Setup A zur Bestimmung des Emissionsgrades von Ti-6Al-4V (Abstand 280mm und einem Winkel von ca. 38°)	32
Abbildung 19: Setup B zur Bestimmung des Emissionsgrades von Ti-6Al-4V (Abstand 250mm und einem Winkel von ca. 45°)	33
Abbildung 20: Prozessdesign Ermittlung Emissionsgrad sowie Substratplatte mit Thermoelementen	35
Abbildung 21: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaues Wände und Blöcke für einen fixen Abstand zum Strahlzentrum	37

Abbildung 22: Bestimmung der Messabstände beim Mehrlagenaufbau.....	38
Abbildung 23: Versuchsaufbau 1 für Wände und Blöcke (Abstand 280mm und einem Winkel von ca. 50°).....	38
Abbildung 24: Aufbauschema zu Versuchsaufbau Wände und Blöcke	39
Abbildung 25: Versuchsaufbau 2 für Wände und Blöcke (Abstand 280mm mit einem Winkel von ca.35°).....	40
Abbildung 26: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaues Wände und Blöcke für einen fixen Punkt auf der Schweißnaht	40
Abbildung 27: Exemplarisch ausgewählter kontaktlos gemessener Temperaturverlauf zur Bestimmung des Emissionsgrads.....	42
Abbildung 28: Emissionsgradbestimmung ohne Vorschub an Folienmaterial: a) deutlich sichtbare Sperrschicht an Folienoberfläche; b) zusätzliche Schutzglasscheibe praktisch ohne Beeinträchtigung; c) und d) Halterung der Schutzglasscheibe	43
Abbildung 29: Emissionsgradbestimmung mit zu geringem Vorschub an Folienmaterial: 1) unbenütztes Folienmaterial und 2) verwendetes Folienmaterial	44
Abbildung 30: Emissionsgradbestimmung mit Wickelproblemen beim Folienmaterial: Folie 1.) unbenützt und Folie 8.) weist deutliche Veränderungen auf	45
Abbildung 31: Darstellung der unterschiedlichen Temperaturverläufe aufgliedert in Emissivität und verwendetem Setup.....	46
Abbildung 32: Quantitative Auswertung der Messergebnisse für die Emissionskoeffizientenbestimmung der zwei verwendeten Setups.....	47
Abbildung 33: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Messfleckgrößen von Pyrometer und Thermoelement sowie der Einfluss von unterschiedlichen Temperaturgradienten	48
Abbildung 34: Temperaturmessung der AM-Struktur Double-Wall für die erste Lage mit Abständen von 10 bis 35mm zwischen Messfleck Pyrometer und Strahlzentrum Elektronenstrahl	50
Abbildung 35: Temperaturtransient für die erste Lage der AM-Struktur Double-Wall mit eingezeichnetem Δt für die erste Schweißraupe und 10mm Messdistanz	51
Abbildung 36: Temperaturfeld AM-Struktur Single-Wall für die erste Lage	52
Abbildung 37: Ergebnis „Single-Wall“ Messdistanz 25mm.....	53
Abbildung 38: AM-Struktur „Single-Wall“ mit auftretendem „ <i>humping phenomenon</i> “	53
Abbildung 39: Optische Beurteilung AM-Struktur „Single-Wall“: a.) Aufgebaute und gereinigte Strukturen, und b) saubere, nicht beschlagener Folienabschnitt.....	54
Abbildung 40: Temperaturverläufe für verschiedene relative Abstände AM-Struktur „Double-Wall“ a.) erste Spur und b.) zweite Spur	54

Abbildung 41: Temperaturzyklus der ersten Lage für die erste und zweite Spur der AM-Struktur „Double-Wall“	55
Abbildung 42: Temperaturverlauf der ersten Lage des AM Bauteils „Double Wall“ mit einer Messdistanz zwischen Pyrometermessfleck und Strahlzentrum von 15mm.....	56
Abbildung 43: Optische Beurteilung AM-Struktur „Double-Wall“: a.) Aufgebaute und nicht gereinigte Strukturen, und b) saubere, nicht beschlagener Folienabschnitt	56
Abbildung 44: Temperaturverlauf der vierten Lage des AM Bauteils „Block“ mit einer Messdistanz zwischen Pyrometermessfleck und Strahlzentrum von 15mm.....	57
Abbildung 45: Temperaturentwicklung der erste Lage der AM Struktur „Block“	57
Abbildung 46: Temperaturverlauf der vierten Lage des AM Bauteils „Block“ mit einer Messdistanz zwischen Pyrometermessfleck und Strahlzentrum von 20mm.....	58
Abbildung 47: Optische Beurteilung AM-Struktur „Block“: a.) Aufgebaute und nicht gereinigte Strukturen nach der dritten Lage, und b) nach der vierten Lage	59
Abbildung 48: Temperaturgeschichte mit unterschiedlichen Abkühlstrategien für die AM-Strukturen: (a,b) „Single-Wall“, (c,d) „Double-Wall“ und (e,f) „Block“	59
Abbildung 49: schematische Darstellung eines Positionierungsfehlers vom Pyrometermessflecks und dessen Auswirkung auf das Messergebnis	60
Abbildung 50: Optische Beurteilung AM-Strukturen mit unterschiedlicher Abkühlstrategie: a.) Aufgebaute und gereinigte Strukturen, und b) saubere, nicht beschlagener Folienabschnitt	61
Abbildung 51: detaillierte Ansicht der Oberflächenbeschaffenheit der zweiten Versuchsreihe	61
Abbildung 52: Temperaturentwicklung der AM Struktur „Single-Wall“ mit den berechneten wahren Messabstand zwischen Strahlzentrum und Messfleck (mit * gekennzeichnete Lage war fehlerhaft)	64
Abbildung 53: Zwischenlagentemperatur für die AM Struktur "Single-Wall" 10 bis 40 Sekunden nach Schweißprozess	67
Abbildung 54: Temperaturentwicklung der AM Struktur Double-Wall mit den berechneten wahren Messabstand zwischen Strahlzentrum und Messfleck	67
Abbildung 55: schematische Ausbildung der Isothermen bei der Double-Wall Struktur mit Unterscheidung in Bauteiltemperatur.....	68
Abbildung 56: Zwischenlagentemperatur für die AM Struktur "Double-Wall" 10 bis 40 Sekunden nach Schweißprozess	69
Abbildung 57: Temperaturentwicklung der AM Struktur Multi Wall mit den berechneten wahren Messabstand zwischen Strahlzentrum und Messfleck (mit * gekennzeichnete Lage war fehlerhaft)	69
Abbildung 58: Zwischenlagentemperatur für die AM Struktur "Block" 10 bis 40 Sekunden nach Schweißprozess	70

Abbildung 59: Charakteristische $t_{8/5}$ Zeit für die beiden verwendeten Abkühlstrategien zum Aufbau einer AM-Struktur „Single-Wall“ Abkühlverhalten Single-Wall.....	72
Abbildung 60: Charakteristische $t_{8/5}$ Zeit für die beiden verwendeten Abkühlstrategien zum Aufbau einer AM-Struktur „Double-Wall“	73
Abbildung 61: Charakteristische $t_{8/5}$ Zeit für die beiden verwendeten Abkühlstrategien zum Aufbau einer AM-Struktur „Block“	73
Abbildung 62: mögliche Weiterentwicklung der bestehenden Schutzvorrichtung mit innen liegender Antriebseinheit	77
Abbildung 63: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Inline-Control Versuche a.) konstanter Ort und b.) mit konstanter Bewegung	78

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Physikalische Eigenschaften von reinem Titan in Anlehnung an [9] [10]	4
Tabelle 2: Physikalische Eigenschaften von Aluminium in Anlehnung an [9] [10]	6
Tabelle 3: Physikalische Eigenschaften von Vanadium in Anlehnung an [17] [18].....	7
Tabelle 4: Physikalische Eigenschaften von Ti-6Al-4V in Anlehnung an [14].....	8
Tabelle 5: Charakteristische Eigenschaften des Elektronenstrahlschweißens Im Vergleich zu konventionellen Verfahren in Anlehnung an [22].....	11
Tabelle 6: Genormte Fixpunkte der praktischen Temperaturskala bei Normaldruck in Anlehnung an [26]	14
Tabelle 7: Auswahl an Temperaturmesstechnik in Anlehnung an [26] [27]	14
Tabelle 8: Vor- und Nachteile von Pyrometern in Anlehnung an [27].....	18
Tabelle 9: Mögliche Fehlerquellen bei Strahlungsthermometer in Anlehnung an [24].....	21
Tabelle 10: Empfohlene Maximaltemperatur für Typ K in Anlehnung an [24].....	22
Tabelle 11: Eigenschaften von Polyimiden in Anlehnung an [31].....	23
Tabelle 12: Kennwerte vom Getriebemotor laut [35].....	29
Tabelle 13: Umrechnung von Volt in Umdrehungen pro Minute für den Getriebemotor mit dem verwendeten Drehzahlbereich.....	29
Tabelle 14: Eigenschaften von Kapton HN in Abhängigkeit der Fertigungsdicke mit der verwendeten Konfiguration von 25µm laut [36].....	30
Tabelle 15: Emissionsgrad lt. Literatur für Titan und Titanlegierungen in Abhängigkeit von Wellenlänge bzw. Oberflächenqualität laut [37]–[42]	36
Tabelle 16: Gewählte Parameter für die Versuchsdurchführung.....	36
Tabelle 17: Verwendete Parameter bei den "Inline-Control" Versuchen	77

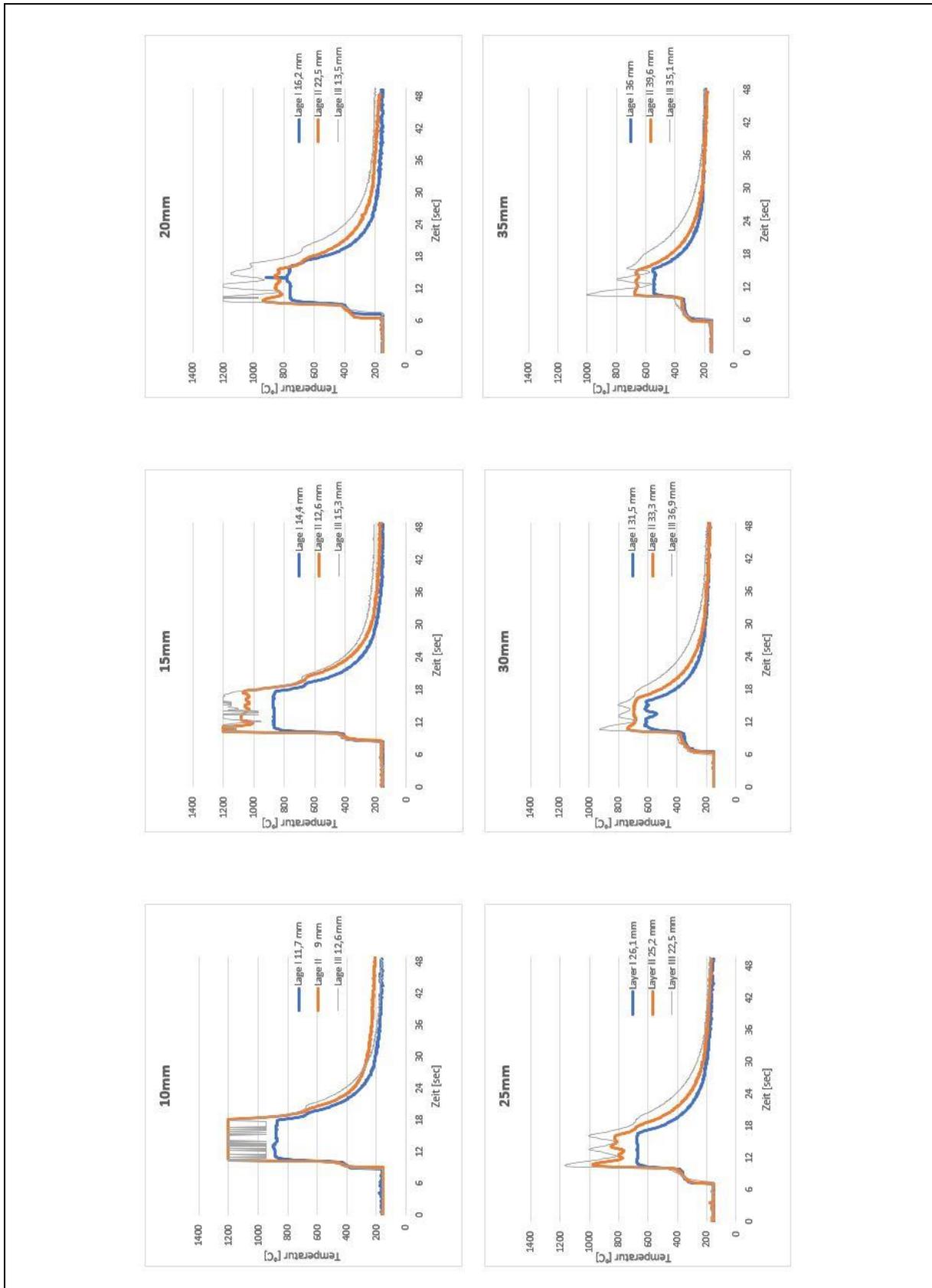
Abkürzungsverzeichnis

α	Alpha
β	Beta
ε	Epsilon/Emissionskoeffizient
AM	additive manufacturing
CAD	computer aided design
Pa	Pascal [N/m ²]
m	Meter
°C	Grad Celsius
K	Kelvin
min ⁻¹	Umdrehungen pro Minute
V	Volt
Hz	Herz
v	Geschwindigkeit [m/s]
t _{8/5}	Zeit von 800°C auf 500°C
bzw.	beziehungsweise
ca.	zirka
z.B.	exempli gratia
etc.	et cetera
i.d.R.	in der Regel
sec.	Sekunde
WEZ	Wärmeeinflusszone

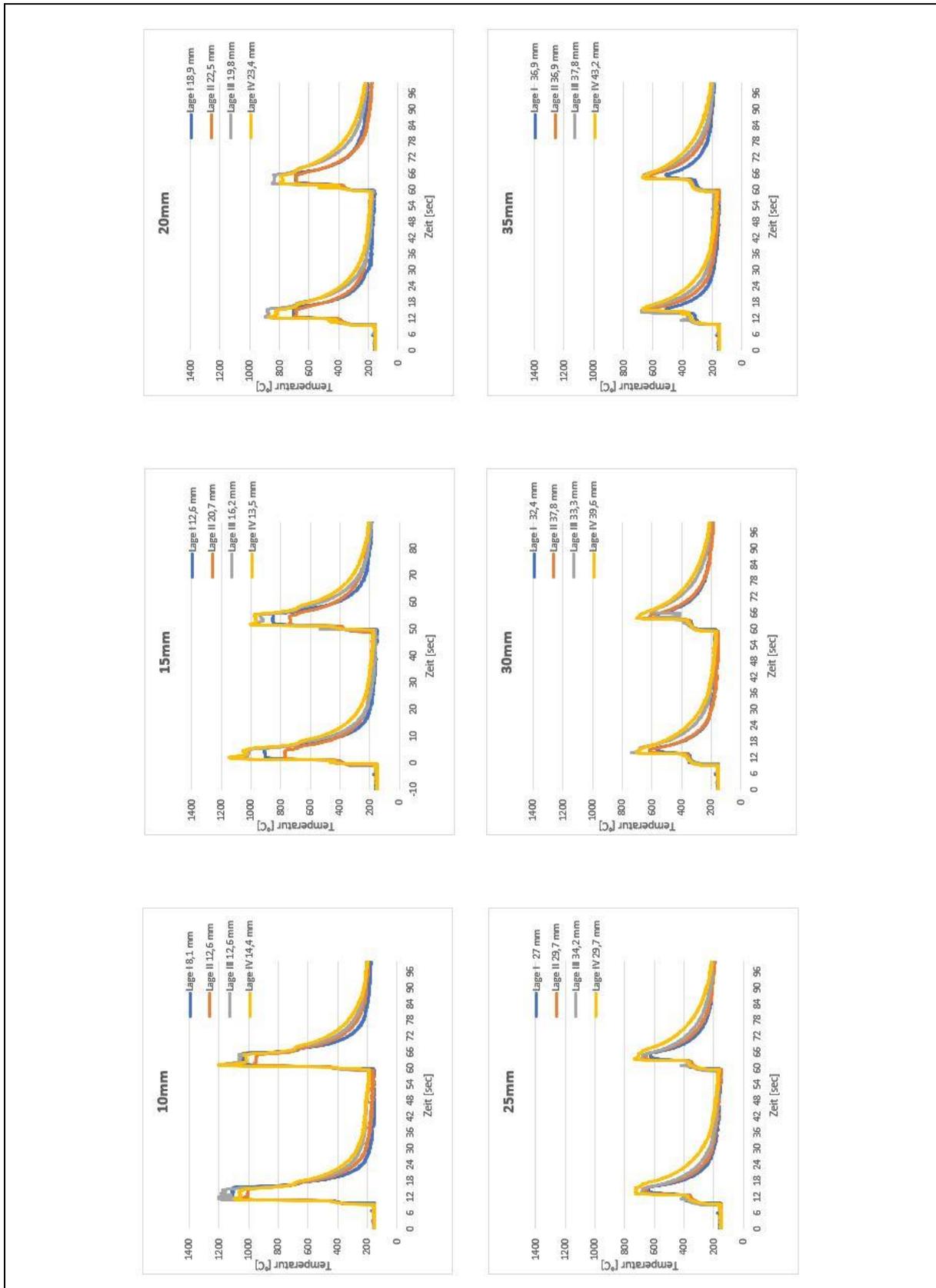
Anhang

Anhang 1: Vollständiger Temperaturverlauf „Single-Wall“ mit wahren berechneten Messdistanzen unterteilt nach Abstand	89
Anhang 2: Vollständiger Temperaturverlauf „Double-Wall“ mit wahren berechneten Messdistanzen unterteilt nach Abstand	90
Anhang 3: Vollständiger Temperaturverlauf „Block“ mit wahren berechneten Messdistanzen unterteilt nach Abstand	91
Anhang 4: Emissionsgradbestimmung $\varepsilon = 0.35$ Setup A.....	92
Anhang 5: Emissionsgradbestimmung $\varepsilon = 0.35$ Setup B.....	93

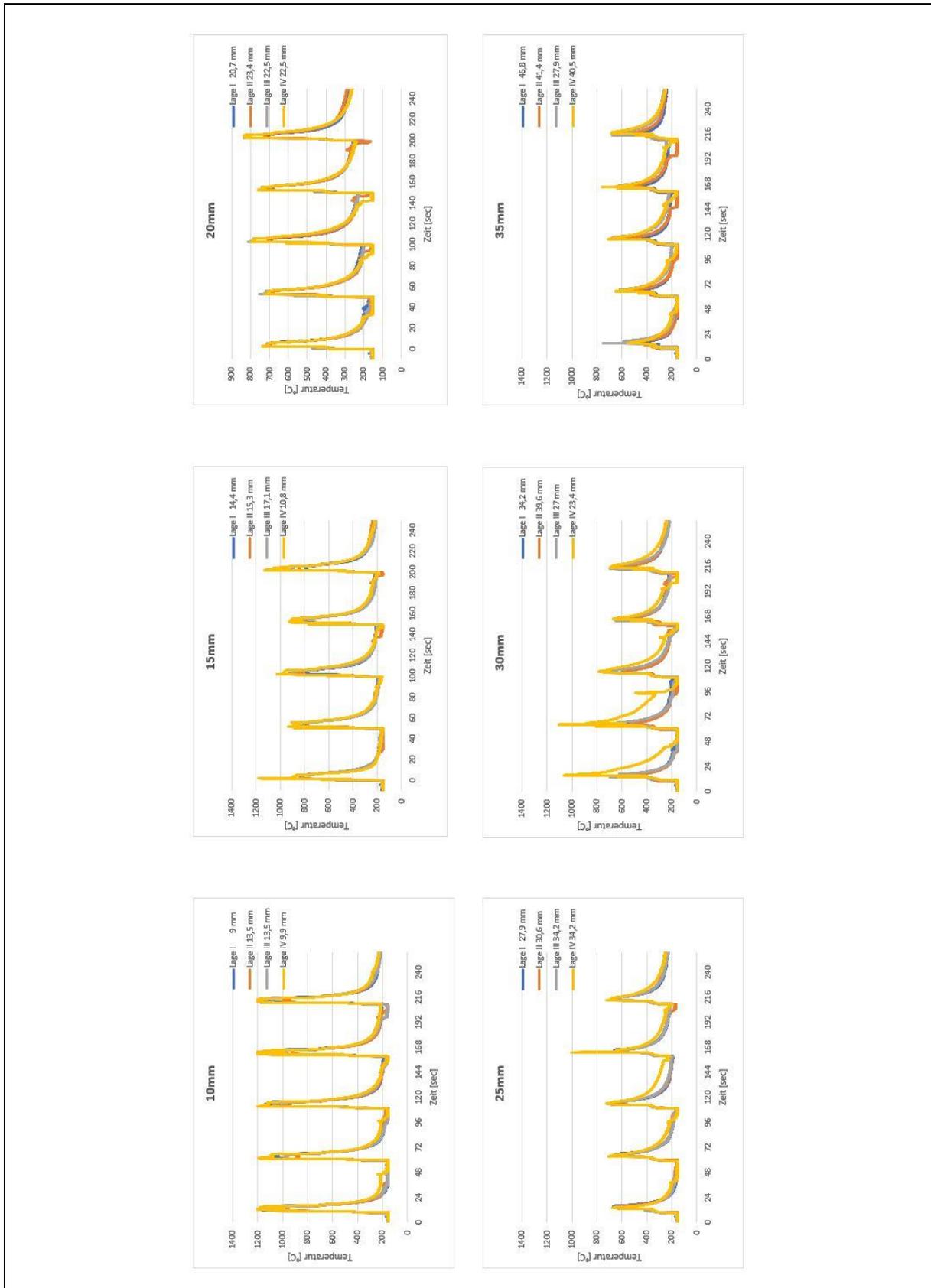
Anhang 1: Vollständiger Temperaturverlauf „Single-Wall“ mit wahren berechneten Messdistanzen unterteilt nach Abstand

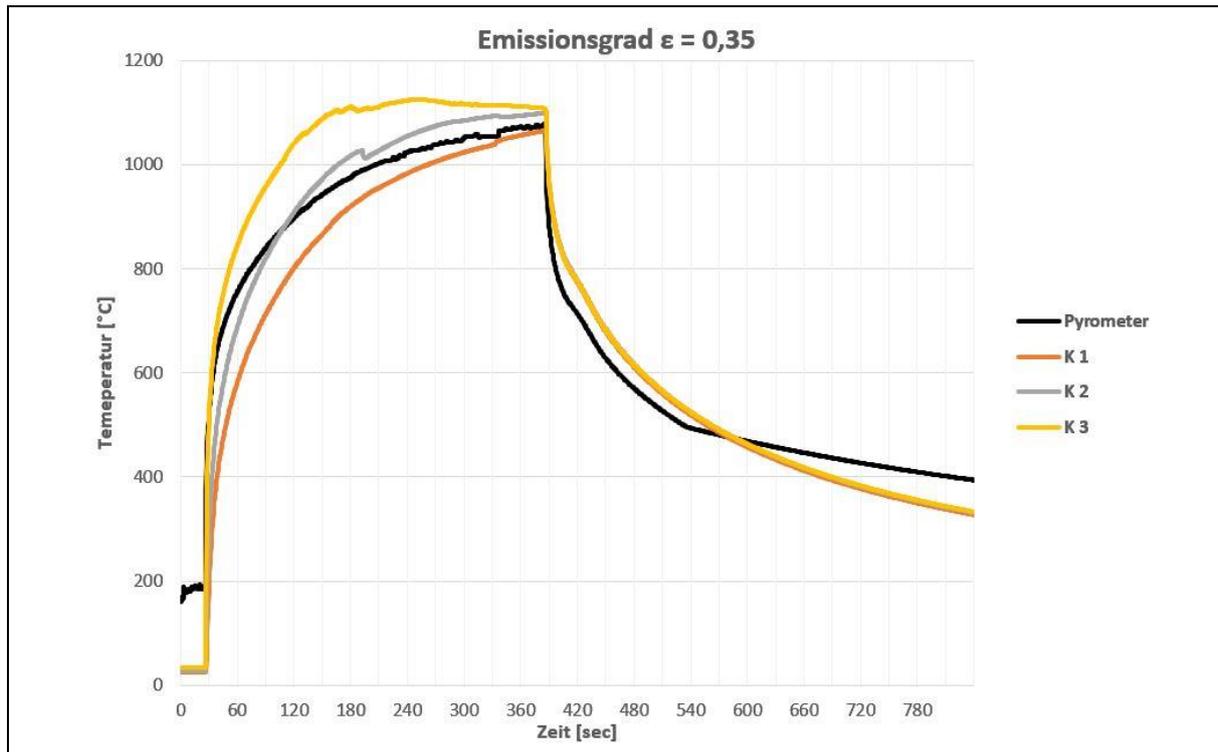


Anhang 2: Vollständiger Temperaturverlauf „Double-Wall“ mit wahren berechneten Messdistanzen unterteilt nach Abstand



Anhang 3: Vollständiger Temperaturverlauf „Block“ mit wahren berechneten Messdistanzen unterteilt nach Abstand



Anhang 4: Emissionsgradbestimmung $\epsilon = 0.35$ Setup A

Anhang 5: Emissionsgradbestimmung $\epsilon = 0.35$ Setup B