



Lehrstuhl für Umformtechnik

Masterarbeit



Wirtschaftlicher Vergleich zwischen additiv
und konventionell hergestellten Bauteilen
aus Inconel718 – Optimierung und Analyse

Anna Köll, BSc

November 2022



EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 11.11.2022

Unterschrift
Verfasser/in
Anna Köll

Danksagung

Auf dem Weg durch mein Studium und auch während der Entstehungsphase dieser Arbeit haben mich einige tolle Menschen begleitet, bei denen ich mich besonders bedanken möchte.

In erster Linie möchte ich mich bei Herrn Prof. Martin Stockinger bedanken, für die Geduld und die Unterstützung die er mir in dieser Zeit entgegengebracht hat.

Des Weiteren gilt mein besonderer Dank Herrn Martin Dopler, der mir die Idee für diese Arbeit lieferte, und allen Mitarbeitern der Metalpine GmbH, die mich nicht nur mit der Bereitstellung des Werkstoffes, sondern auch mental unterstützt haben.

Vielen Dank an die Firma Fuchshofer Advanced Manufacturing für die Herstellung der Proben und der Bereitstellung der Daten.

Im Speziellen gilt mein Dank Herrn Gerhard Panzl, für seine Hilfestellung bei jeglichen Problemen und all seine Antworten auf meine Fragen.

Herrn Alexander Walzl gilt mein besonderer Dank für die schnelle und unkomplizierte Korrektur und Betreuung dieser Arbeit.

Ein weiterer Dank gilt all meinen Freunden, die mit mir gelernt, gezittert und gefeiert haben. Ohne euch hätte ich das nie zu Ende gebracht.

Vor allem aber gilt mein größter Dank meinen Eltern und meinen Schwestern, ohne deren finanzieller und mentaler Unterstützung ich nicht die Möglichkeit gehabt hätte, dieses Studium zu bestreiten.
DANKE!!!

Und last but not least, vielen Dank an meinen Freund Bernd, der mich den Großteil des Studiums begleitet hat und auf dessen Unterstützung ich immer zählen konnte.

Kurzfassung

Die wirtschaftliche Entwicklung der additiven Fertigung stieg in den letzten Jahren rasant an und ist mittlerweile in nahezu allen Bereichen der Industrie angekommen. Durch die hohe Designfreiheit bietet sie eine ausgezeichnete Ergänzung zu herkömmlichen Fertigungsmethoden. Speziell der Laser Powder Bed Fusion Prozess eröffnet neue Möglichkeiten in Hinblick auf Leichtbau und Komplexität von Bauteilen. Da industrielle Herstellungsverfahren sich dauerhaft im Wettbewerb zueinander befinden, ist es von großem Interesse die Wirtschaftlichkeit eines Produktionsprozesses stetig zu steigern. Zentrales Thema dieser Arbeit ist die wirtschaftliche Darstellung des additiven Fertigungsprozesses, sowie dessen maßgebliche Abhängigkeit von Prozessparametern wie z.B. Schichtstärke und Scangeschwindigkeit. So führt z.B. eine Verdopplung der Schichtstärke zu signifikant kürzeren Bauzeiten und dadurch zu einer deutlichen Reduktion der Herstellungskosten. Im Fokus steht hierbei, der in der Luftfahrt häufig anzutreffende Nickelbasis-Werkstoff IN718. Dieser weist für Anwendungen, zum Beispiel in Strahltriebwerken, eine hervorragende Eignung hinsichtlich thermischer Beständigkeit und Festigkeit auf. Da dieser Werkstoff in der Regel konventionell verarbeitet wird, ist ein direkter Vergleich mit der additiven Fertigungsmethode, sowie eine ökonomische und ökologische Betrachtung hinsichtlich Werkzeugstandzeiten und Ressourcenverbrauch möglich. Die Untersuchungsgrundlage bildet in der vorliegenden Arbeit ein standardisiertes Bauteil, anhand dessen wesentliche Prozesscharakteristika konventioneller als auch additiver Fertigungstechnologien ausgewertet, analysiert und schlussendlich gegenübergestellt werden können.

Abstract

The economic development of additive manufacturing has increased rapidly in recent years and has reached almost all industry areas. Due to the high degree of design freedom, it offers an excellent complement to conventional manufacturing methods. In particular, the laser powder bed-fusion process opens up new possibilities in lightweight construction and component complexity. As industrial manufacturing processes constantly compete, it is of high interest to continuously increase the economic efficiency of a production process. The central topic of this thesis is the economic representation of the additive manufacturing process, as well as its significant dependence on process parameters such as layer thickness and scan speed. For example, doubling the layer thickness leads to significantly shorter build times and, thus, a significant reduction in manufacturing costs. The focus here is on the nickel-based material IN718, frequently encountered in the aerospace industry. This material is outstandingly suitable for applications in jet engines, for example, thermal resistance and strength. Since this material is usually processed conventionally, a direct comparison with the additive manufacturing method is possible, as well as an economic and ecological consideration concerning tool life and resource consumption. In this study, a standardized component forms the basis for the investigation, based on which the essential process characteristics of conventional and additive manufacturing technologies can be evaluated, analyzed and finally compared.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Zielsetzung	2
1.1. Die wirtschaftliche Entwicklung der additiven Fertigung	2
1.2. Zielsetzung	4
2. Stand der Technik	5
2.1. Nickelbasislegierung Inconel 718	5
2.2. konventionelle Bearbeitung von IN718	9
2.3. LPBF – Der Prozess	10
2.4. LPBF-Prozess für Inconel 718	20
2.5. Anforderungen an Pulverwerkstoff	22
3. Methodenplanung	23
4. Versuchsdurchführung	26
4.1. Pulvercharakterisierung	26
4.2. Parameterstudie	28
4.3. Kostenaufstellung	30
5. Ergebnisse und Diskussion	32
5.1. Ergebnisse der Parameterstudie	32
5.2. Wirtschaftliche Betrachtung	39
6. Zusammenfassung und Ausblick	46
Abbildungsverzeichnis	47
Tabellenverzeichnis	49
Literaturverzeichnis	50

Abkürzungsverzeichnis

L-PBF	Laser- Powder Bed Fusion
AM	Additive Manufacturing (additive Fertigung)
ASTM	American Society for Testing Materials
PSD	Particle Size Distribution
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
P	Laserleistung [W]
v	Scangeschwindigkeit [mm/s]
h	Hatch-Abstand [mm]
t	Schichtstärke [mm]

1. Einleitung und Zielsetzung

1.1. Die wirtschaftliche Entwicklung der additiven Fertigung

Egal ob ein Abbild eines Brautpaares auf einer Hochzeitstorte, der personalisierte Schlüsselanhänger oder die selbstdesignten Ohringe. Wo herkömmliche Fertigungsmethoden an ihre Grenzen stoßen, beginnt der Einsatz der additiven Fertigung. Wie schon der Name verrät, wird im Gegensatz zu herkömmlichen subtraktiven Methoden, wie Drehen oder Fräsen, ein Bauteil additiv Schicht für Schicht erstellt [1]. Durch diese Eigenschaft bildet diese Technologie eine exzellente Ergänzung zu konventionellen Fertigungsverfahren. Durch dieses Verfahren können komplexe und filigrane Strukturen erzeugt werden, die dennoch hohe Festigkeiten aufweisen. Es eröffnet sich die Möglichkeit durch innenliegende Kühlkanäle funktionale Bauteile herzustellen oder Baugruppen, die aus mehreren Bauteilen bestehen durch eines zu ersetzen.

Bereits in den 1990er Jahren wurde die additive Fertigung im Bereich Prototypenbau und Werkzeugbau eingesetzt, um schnell ein gewünschtes Bauteil zu kreieren [2]. Heutzutage, in einer Zeit in der der ökologische Fußabdruck bei der Herstellung von Bauteilen immer deutlicher in den Vordergrund rückt, ist es notwendig auch die wirtschaftlichen Aspekte der additiven Fertigung genauer zu betrachten [3]. In Abbildung 1 sind die Kosten der Herstellung eines Bauteils, abhängig von dessen Komplexität, dargestellt. Bei wenig komplexen Bauteilen liegen die Kosten konventioneller Fertigung deutlich unter denen der additiven Fertigung, da sich bei einfachen Bauteilen, die Werkzeugkosten in Grenzen halten. Jedoch steigen mit der Komplexität der Bauteile auch die Kosten der Werkzeuge. Dem entgegen stellt sich die additive Fertigung, da sie unabhängig vom Grad der Komplexität ist und Bauteile gänzlich ohne Werkzeuge erstellt werden können.

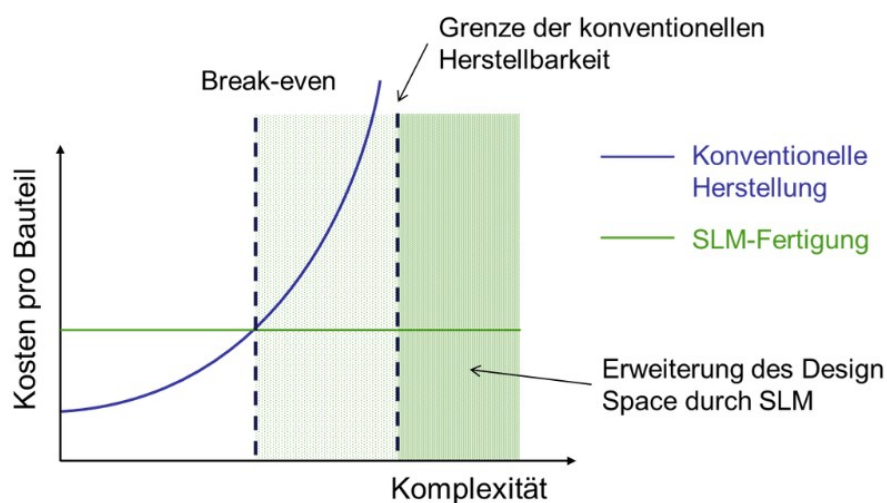


Abbildung 1: Zusammenhang Kosten und Komplexität abhängig von Fertigungsverfahren [4]

Abhängig der Losgröße, spielt die Auswahl der Herstellungsmethode eine erhebliche Rolle. Da der Bauraum der additiven Fertigung begrenzt ist, ergibt sich eine maximale Anzahl an Bauteilen, die während eines Bauprozesses erstellt werden können. Dem gegenüber stellt sich die konventionelle Produktion, welche mit steigender Stückzahl günstiger wird. Da in der additiven Fertigung jegliche Art von Werkzeugbau entfällt, liegt diese im Prototypenbau jedoch klar im Vorteil gegenüber anderen Fertigungsmethoden. Über Einsatzgebiete, Eigenschaften und Grenzen herrscht jedoch immer noch viel Unklarheit. Um den Prozess rational einsetzen zu können, benötigt es einiges an Know-How und Erfahrung beziehungsweise setzt es ein „additives Denken“ voraus [5]. Die additive Fertigung fördert und fordert somit eine neue Herangehensweise, bereits in der Designphase eines Bauteils [6]. Eine Marktanalyse, dargestellt in Abbildung 2, zeigt wie rasant die Nachfrage an additiv gefertigten Bauteilen in den letzten Jahren anstieg und wie sich der Trend bis 2030 weiterentwickelt. Im Jahr 2015 lag das globale Marktvolumen für Metall und Polymer 3D- Druck für alle Branchen deutlich unter einer Milliarde Euro. Mittlerweile sind mehr als 20 verschiedene Fertigungsverfahren bekannt, welche ein breites Spektrum an Werkstoff- und Produktionsanforderungen abdecken können [7]. Dadurch ergeben sich immer mehr Einsatzmöglichkeiten für spezielle Anforderungen, wie sie zum Beispiel im Luft- und Raumfahrtbereich und in der Medizintechnik auftreten. Dies führt dazu, dass diese Bereiche laut Prognose den höchsten Zuwachs an Marktvolumen erreichen werden [8].

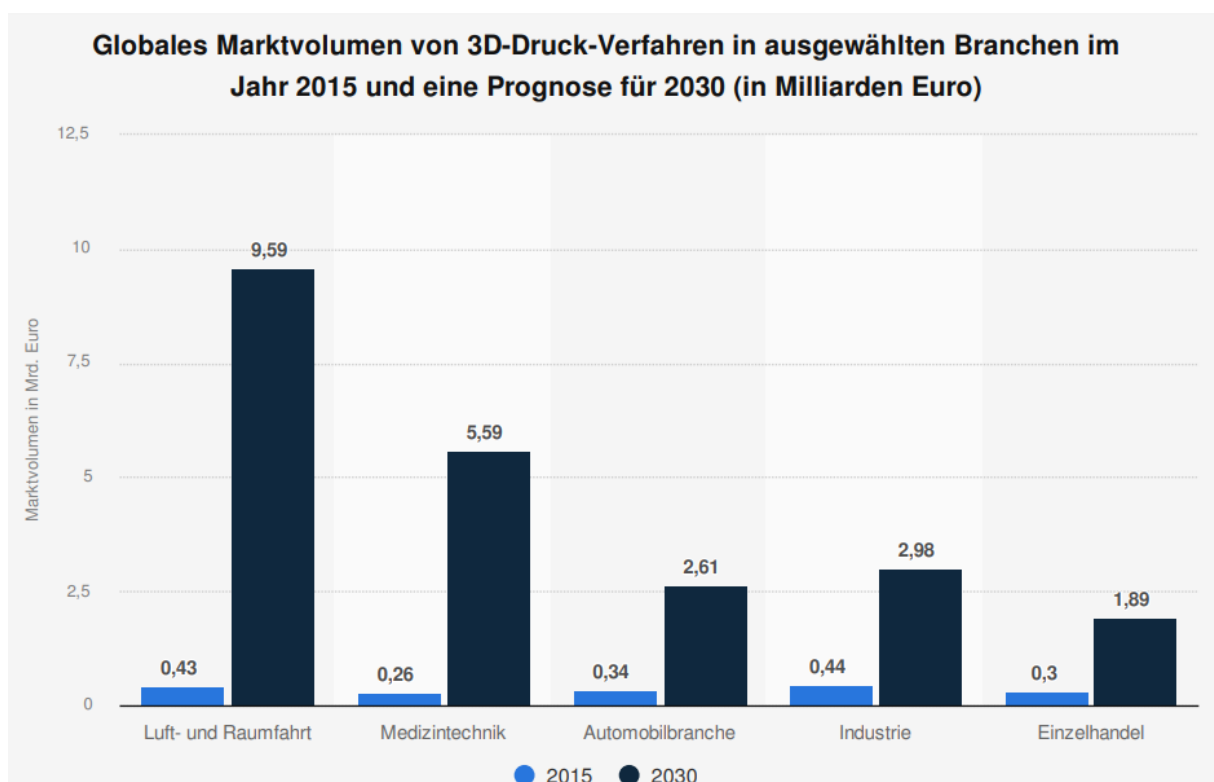


Abbildung 2: Globales Marktvolumen von 3D-Druck-Verfahren in ausgewählten Branchen im Jahr 2015 und eine Prognose für 2030 [9]

Durch die ständige Weiterentwicklung von Materialien, Maschinen und Technologien wurden in den letzten Jahren die Baugeschwindigkeit, die Genauigkeit und die Reproduzierbarkeit deutlich verbessert, was dazu führt, dass Bauteile immer schneller und billiger hergestellt werden können und auch das Know-How und die Erfahrungswerte in diesem Fertigungsbereich steigt [10].

1.2. Zielsetzung

Im Zuge dieser Arbeit werden unterschiedliche Herstellungsverfahren hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit betrachtet und die Kosten für die Produktion eines Standardbauteils verglichen mit dem Schwerpunkt auf die additive Fertigung.

Beim verwendeten Werkstoff handelt es sich um Inconel 718, eine Nickelbasislegierung, welche durch ihre hohe Warmfestigkeit hauptsächlich für Hochgeschwindigkeits- Flugzeugteile aber auch im Prototypenbau im Bereich der Luft- und Raumfahrt als auch im Motorsport Verwendung findet [11]. Diese Einsatzgebiete stellen hohe Anforderungen an den Werkstoff und auch oft an die Komplexität der Bauteile. Da dieser Werkstoff bei der herkömmlichen Bearbeitung wie Drehen und Fräsen durch seine mechanischen Eigenschaften zu tendenziell niedrigeren Werkzeugstandzeiten durch hohen Werkzeugverschleiß sowie durch die niedrigen Schnittgeschwindigkeiten zu hohen Produktionskosten führt, stellt die additive Fertigung, allen voran der Laser-Powder Bed Fusion Prozess (L-PBF) eine wirtschaftliche Alternative dar. Die additive Fertigung bietet sich einerseits an, um endkonturnahe Bauteile herzustellen, welche einen deutlich geringeren Aufwand der Nachbearbeitung aufweisen und andererseits können komplexe Geometrien erstellt werden, welche mit herkömmlichen Methoden nur schwierig oder gar nicht gebaut werden können. Die herkömmliche Schichtstärke mit der Inconel 718 im L-PBF Prozess gefertigt wird, liegt zwischen 30 und 60 μm . Ziel dieser Arbeit ist es zu zeigen, dass eine Steigerung der Schichtstärke auf 80 μm und des dazu passenden Parameterdatensatzes auch zu dichten Bauteilen (>99,5% relative Dichte) mit äquivalenten mechanischen Eigenschaften wie herkömmlich gebaute Bauteile führt. Durch die Verdopplung der Schichtstärke kann die Bauzeit erheblich gesenkt werden, was sich in den Herstellungskosten deutlich widerspiegelt. Die gesamten Kosten für die Anschaffung, den Betrieb und der Nutzung pro Jahr, werden in einem Maschinenstundensatz berücksichtigt. Da sich die Produktionskosten aus der Multiplikation von Maschinenstundensatz und Bauzeit ergeben, hat eine Reduktion der Bauzeit einen drastischen Einfluss auf den Bauteilpreis. Um dies zu verdeutlichen wird ein direkter Vergleich der Auswirkung der unterschiedlichen Schichtstärken auf die Herstellungskosten dargestellt. In weiterer Folge werden für ein bestimmtes Bauteil die Herstellkosten mittels additiver Fertigung den Produktionskosten mittels konventioneller Herstellung gegenübergestellt und diskutiert.

2. Stand der Technik

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die Untersuchung von Prozessparametern, deren Zusammenspiel sowie die resultierenden Auswirkungen auf die finale und qualitätsbestimmende relative Dichte von Bauteilen und Produkten gegeben. Zusätzlich werden die Einflüsse des additiven Fertigungsprozesses selbst, auf die Entwicklung des Gefüges sowie schlussendlich auf die mechanischen und technologischen Eigenschaften untersucht.

2.1. Nickelbasislegierung Inconel 718

Nickelbasislegierungen gehören zu der Familie der Hochleistungswerkstoffe. In den typischen Anwendungsbereichen wie Flugzeugtriebwerken oder Gasturbinen, muss der Werkstoff hohen mechanischen und thermischen Beanspruchungen standhalten [12]. Im Speziellen besticht Inconel 718, auch bekannt unter NiCr19NbMo oder der Werkstoffnummer 2.4668, mit seinen hervorragenden mechanischen Eigenschaften in einem breiten Temperaturanwendungsfeld. Seine hohe Streckgrenze von bis zu 1180 ± 50 MPa und die Kriechbeständigkeit bei hohen Temperaturen zeichnen diesen Werkstoff aus. Die Hauptkomponenten von Inconel 718 sind Nickel, Eisen und Chrom, welche die Matrix des Werkstoffs bilden. Weitere Legierungselemente wie Titan, Aluminium, Niob und Molybdän haben unterschiedliche Auswirkungen auf den Werkstoff und beeinflussen somit seine mechanischen Eigenschaften. Tabelle 1 zeigt die Toleranzgrenzen der chemische Zusammensetzung der Legierung [13].

Tabelle 1: chemische Zusammensetzung von IN718 [14]

	Ni	Cr	Nb	Mo	Ti	Co	Al	Si	Mn	andere	Fe
Min. [Gew.-%]	50,0	17,0	4,75	2,8	0,65	-	0,2	-	-	-	Rest
Max. [Gew.-%]	55,0	21,0	5,5	3,3	1,15	1,0	0,8	0,35	0,35	0,5	Rest

Um zu verstehen warum Inconel 718 einer der leistungsfähigsten Werkstoffe ist, führt kein Weg daran vorbei seine Mikrostruktur zu betrachten. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die in der Legierung enthaltenen Phasen. Je nach Wärmebehandlung stellen sich unterschiedliche Volumenanteile der Phasen und somit eine Veränderung der mechanischen Eigenschaften ein [15].

Tabelle 2: Zusammenfassung der Phasen von Inconel718 in additiv gefertigten Bauteilen [16]

Phasen	Kristallstruktur	Stöchiometrie
γ	FCC	Ni
γ'	FCC	$\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti}, \text{Nb})$
γ''	BCT	Ni_3Nb

Δ	Orthorhombisch	$\text{Ni}_3(\text{Ti},\text{Nb})$
Karbide	Kubisch	$(\text{Nb},\text{Ti})\text{C}$
Laves	HCP	$(\text{Ni},\text{Cr},\text{Fe})_2(\text{Nb},\text{Mo},\text{Ti})$

γ -Phase

Die γ - Matrix, welche hauptsächlich aus Nickel, dem Hauptbestandteil der Legierung besteht, hat eine kubisch flächenzentrierte Kristallstruktur mit hohen Chrom- und Eisenanteilen. Während des Erstarrungsprozesses werden in der Hauptmatrix die Legierungselemente Ti, Nb, Mo und Al eingelagert und wirken sich hauptsächlich festigkeitssteigernd aus. Niob weist jedoch einen deutlich größeren Atomradius als die Atome der Matrix auf, was dazu führt, dass das Gitter so weit gedehnt wird, dass die größeren Nb – Atome zwischen den Atomen der Matrix Platz finden, wie in Abbildung 3 dargestellt ist [17].

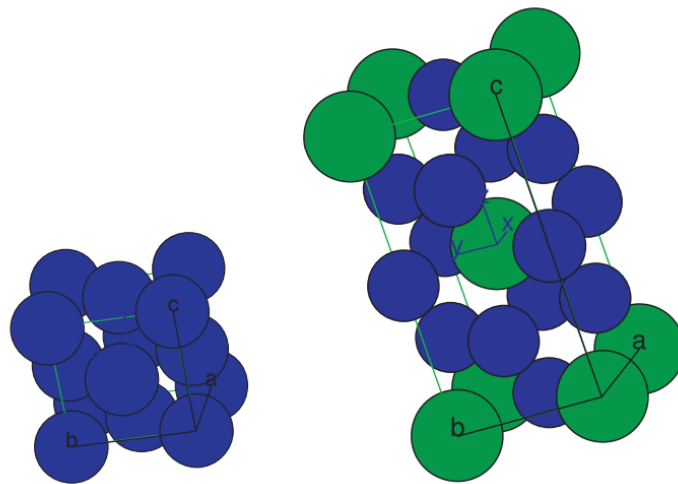


Abbildung 3: Einheitszellen von γ - Matrix und γ'' - Ausscheidungen Ni_3Nb [17]

Diese Dehnung führt zur Speicherung von Verzerrungsenergie. Bei hohen Temperaturen, welche bei einer Wärmebehandlung erreicht werden, diffundieren die größeren Atome zu Fehlstellen in der Matrix, an denen das Gitter ebenfalls verzerrt ist. Dies können Versetzungen, Korngrenzen oder auch Fehlstellen sein [18]. Inconel718 weist im Vergleich zu anderen Nickellegierungen einen hohen Eisen - Gehalt auf, welcher entscheidend für die Bildung der γ'' -Phase ist. Mang et al. [19] weist darauf hin, dass die γ'' -Phase erst bei einem Niob-Gehalt von >12% gebildet wird. Wird jedoch Eisen hinzu legiert, wird die γ'' -Phase bereits bei deutlich geringerem Niob- Gehalt gebildet.

Die γ'' - Phase

Diese Phase bildet die Hauptphase der Legierung und weist eine tetragonal raumzentrierte Struktur auf mit der Stöchiometrie Ni_3Nb . Der Vorteil dieser Phase liegt darin, dass diese bis zu einer Temperatur von ca. 650°C metastabil ist und sich danach erst langsam beginnt (sehr langsam - mehrere tausend Stunden zum Erreichen des thermodynamischen Gleichgewichts) in die δ - Phase umzuwandeln [20], [17].

Die δ - Phase

Die orthorhombische Struktur von Ni_3Nb bildet die Deltaphase und befindet sich hauptsächlich an den Korngrenzen. Diese ist die stabile Variante der γ'' -Phase und bildet sich entweder direkt bei der Erstarrung aus der Schmelze, durch Wärmebehandlungen oder nach sehr langer Zeit aus der γ'' - Phase bei 650°C Betriebstemperatur [20]. Im Allgemeinen ist die δ - Phase unerwünscht, da sie bekanntlich die Bruchzähigkeit und die Duktilität des Werkstoffes verringert. In manchen Fällen hat sie sich jedoch durch die Stabilisierung der Korngrenzen und der Erhöhung der Spannungsbruchfestigkeit als vorteilhaft erwiesen [21].

Die γ' - Phase

Die γ' - Phase besteht aus $\text{Ni}_3(\text{Ti},\text{Al})$ und weist eine kubisch flächenzentrierte Struktur auf. Eigentlich ist die γ' -Phase keine Phase, sondern kohärente Entmischungszone in der Matrix. Durch den geringen Anteil an Ti und Al tritt diese aber nur in geringen Anteilen von ca. 4-5 Vol% auf [20].

Karbide und Nitride

Während dem Abkühlen der Schmelze bilden sich abhängig von Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt Karbide (hauptsächlich NbC) und Nitride (hauptsächlich TiN) aus. Diese sind meist durch ihre unregelmäßige Form zu erkennen. [20] Die festigkeitssteigernde Wirkung der Karbide und Nitride kann jedoch vernachlässigt werden, da sie einen zu geringen Volumenanteil aufweisen [13; 16]. Jedoch können sie den Widerstand gegen Risswachstum negativ beeinflussen und bei hohen Belastungen, Materialausbrüche bzw. -bruch begünstigen. Diese Verringerung ergibt sich durch die hohe Härte und Verschleißfähigkeit, sowie der damit einhergehenden verringerten Bruchzähigkeit [17].

Laves -Phase

Niob ist eines der Elemente, das dazu neigt die unerwünschten Phasen wie die δ - Phase als auch die Laves Phase zu bilden. Diese Phasen beeinträchtigen die mechanischen Eigenschaften der Legierung wie die Ermüdung und die Kriechbrucheigenschaften deutlich. Diese spröden und harten Phasen sind oft die Hauptursache für die Bildung von Rissen unter Belastung. Durch Homogenisieren bei hohen

Temperaturen nimmt der Volumenanteil der Laves Phasen ab und die mechanischen Eigenschaften können deutlich verbessert werden [21] [16].

Abhängig von den Anforderungen und dem Einsatzgebiet des Werkstoffes, sind verschiedene Wärmebehandlungen gebräuchlich. Ausschlaggebend für diese Eigenschaften ist unter anderem die Korngröße eines Materials, welche üblicherweise in ASTM (American Society for Testing Materials) angegeben wird. Dabei wird ein Schlibbild eines Werkstoffes mit der ASTM-Richtreihe verglichen. Eine Skala zwischen 1 (16 Körner/ mm²) und 8 (200 Körner/ mm²) gibt Aufschluss über die Quantität der Körner pro mm². Die Werte 1-3 zählen als grobkörniges Material und 6-8 zählen als Feinkorn [22; 20]. Eine weitere Methode zur Bestimmung der Korngröße des Probenschliffes ist in der VDI- Richtlinie 3405 (Verein Deutscher Ingenieure) zum Strahlschmelzen metallischer Bauteile genannt. Zur Bestimmung der metallurgischen Korngröße wird die internationale Norm DIN EN ISO 643 empfohlen. Um Ausscheidungen mit unterschiedlichen Zusammensetzungen auszuwerten, wird die europäische Norm DIN EN 10247 empfohlen [23].

Wärmebehandlungen für Inconel718

Die folgende Abbildung 4 zeigt ein Zeit – Temperatur – Umwandlungsschaubild (ZTU) für Inconel718. Es zeigt welche Phasen sich nach bestimmter Zeit unter bestimmter Temperatur ausbilden. Es wird von Umwandlung gesprochen, da die Ausscheidung der verschiedenen Phasen im festen Materialzustand stattfinden. Abhängig vom Ausgangsgefüge kann durch unterschiedliche Wärmebehandlungen ein gewünschtes Gefüge eingestellt werden [17].

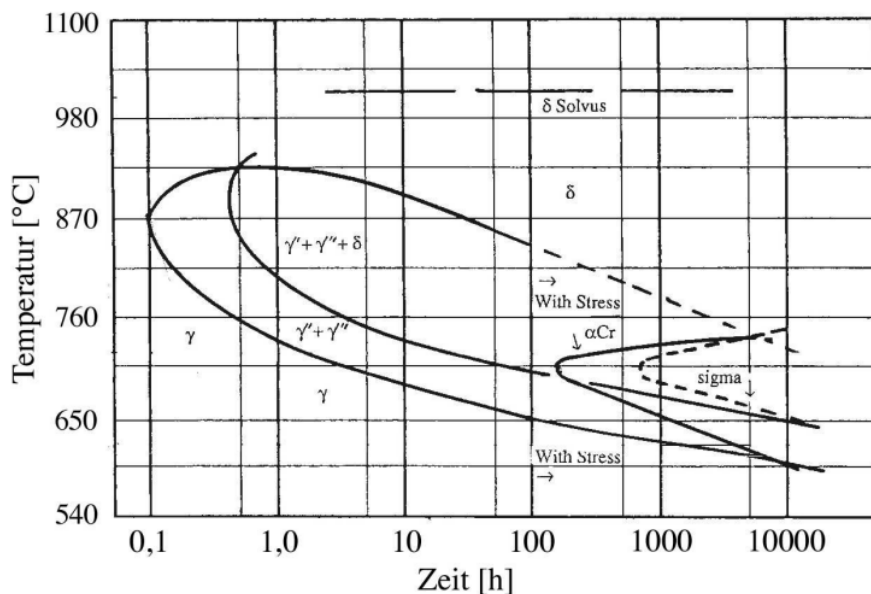


Abbildung 4 : Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Diagramm nach Oradei-Basile und Radavich [24]

- Standard Wärmebehandlung **AMS 5664**

Die Härtingsphasen γ' , γ'' und δ werden während einem einstündigen Lösungsglühen bei 1038 – 1066°C vollständig aufgelöst. Nachdem das Material an Luft abgekühlt wurde, folgt eine zweistufige Auslagerung. Für 10 Stunden wird es bei 760°C und für weitere 10 Stunden bei 649°C ausgelagert. Es stellt sich eine grobe Korngröße von ASTM 4-6 ein. Im Anschluss wird wieder an Luft abgekühlt. Diese Wärmebehandlung empfiehlt sich hauptsächlich für kriechbeanspruchte Bauteile.

- High Strength Wärmebehandlung **AMS 5662**

Ähnlich wie bei der Standard Wärmebehandlung wird eine Stunde bei 927-1010°C lösungsgeglüht und im Anschluss an Luft abgekühlt. Dabei bleibt jedoch die primäre δ -Phase erhalten. Danach folgt eine zweiteilige Auslagerung für jeweils 8 Stunden bei 718°C und 621°C. Bei dieser Wärmebehandlung stellt sich eine feinere Korngröße von ASTM 8 ein, welche vorteilhaft für schwingbeanspruchte Bauteile ist.

2.2. konventionelle Bearbeitung von IN718

Die hervorragenden Eigenschaften von IN718, wie die hohe Festigkeit bei hohen Einsatztemperaturen, machen den Werkstoff jedoch auch zu einem schwer zu bearbeitenden Material [25]. Die harten Phasen im Gefüge sind verantwortlich für ein hohes Abrasionsverhalten bei der Bearbeitung. Dies und die niedrige Wärmeleitfähigkeit führen zu hohen Schnittkräften und hohen Temperaturen im Werkzeug. Laut Schätzungen kann die mechanische Beanspruchung an den Schneidwerkzeugen einen Spitzenwert von 450 MPa und Schneidtemperaturen von bis zu 1100°C erreichen [26]. Um die hohen Schnittkräfte und Temperaturen zu minimieren, werden niedrige Schnittgeschwindigkeiten und geringe Vorschübe verwendet, was jedoch wiederum zu niedriger Produktivität führt. Inconel 718 wird unter anderem auch für sicherheitskritische Bauteile verwendet, bei denen eine hohe Oberflächengüte von besonderer Bedeutung ist. Um diese sicherzustellen werden Schneidwerkzeuge vor Erreichen der Standzeit entsorgt um werkzeugverschleißbedingte Beschädigungen an der Oberfläche zu vermeiden [27]. Durch die hohen Anforderungen an das Werkzeug, ist die Bearbeitung von Inconel 718 auf Werkzeuge 3er Werkstofffamilien beschränkt: CBN, Keramik, Karbide mit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten.

2.3. LPBF – Der Prozess

Der Laser Powder Bed Fusion Prozess ist ein pulverbettbasierter Laserstrahl – Schmelzprozess und gehört wohl zu den bekanntesten Vertretern der additiven Fertigung. Als Grundlage dient ein 3D Modell, welches mit fast allen auf dem Markt erhältlichen CAD- Programmen (Computer Aided Programm) erstellt werden kann.

Bereits in der Designphase kann durch computergestützte Optimierungsprogramme, der Volumenkörper dahingehend verändert werden, sodass er die Gestaltungsrichtlinien der additiven Fertigung erfüllt. Auch Simulationsprogramme kommen bereits in dieser Phase zum Einsatz um überflüssiges Material und dadurch Masse einzusparen. Der optimierte Volumenkörper wird anschließend in ein STL- Dateiformat (Standard Triangle Language) umgewandelt welches als Grundlage zur weiteren Verarbeitung dient. Eine STL- Datei stellt mit Hilfe von Dreieckesfacetten die Oberfläche eines Modelles dar. Je detaillierter die Struktur, umso mehr Dreiecke beschreiben das Modell. Das Prinzip wird in Abbildung 5 veranschaulicht.



Abbildung 5: Kugel mit unterschiedlich vielen Polygonen [28]

Da beim Bauprozess das Bauteil Schicht für Schicht aufgebaut wird, muss das virtuelle Modell gesliced, sprich in einzelne Schichten zerlegt. Zur Vorbereitung für den Bauprozess und als Schnittstelle zwischen Modell und Maschine wird ein Build- Processor, ein Programm zur Daten- und Bauvorbereitung eingesetzt. Die einzelnen Schritte der Bauteilumwandlung werden in Abbildung 6 detaillierter beschrieben.

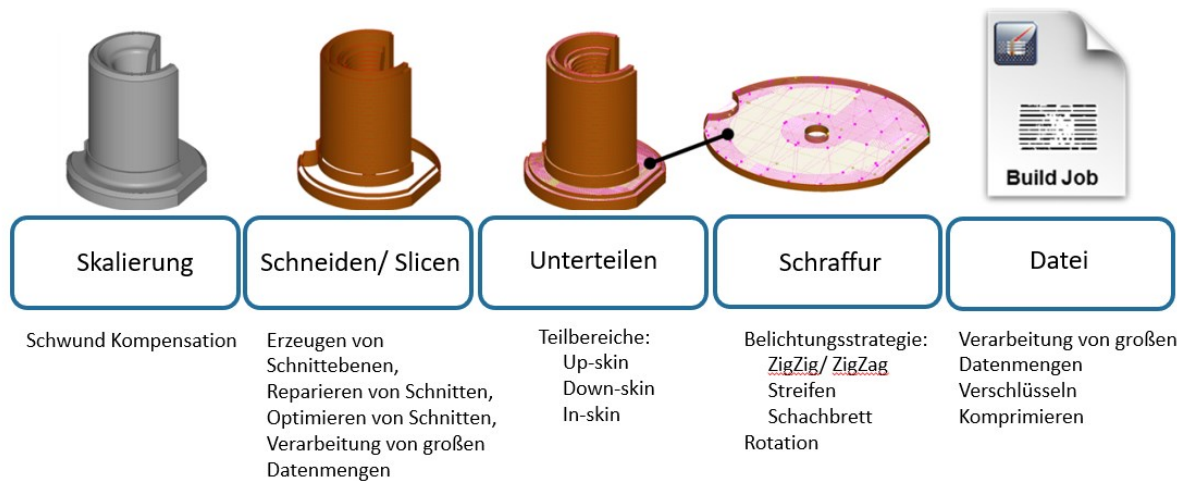


Abbildung 6: Funktion von Build Prozessor [29]

Mit Hilfe des Build- Processors können zusätzliche Gitterstrukturen eingefügt werden. Diese werden Supportstrukturen genannt. Die Hauptaufgabe der Strukturen liegt darin der Schwerkraft entgegenzuwirken und dadurch Überhänge im Bauteil zu stützen. Doch auch bei feinen und dünnwandigen Geometrien werden die Supportstrukturen verwendet, um dem durch Eigenspannungen hervorgerufenem Verzug entgegenzuwirken [30].

Der Build-Prozessor ermöglicht es auch die Bauteile auf der Bauplattform so zu positionieren und zu orientieren um das Bauraumvolumen möglichst effektiv auszunutzen.

Das Herz der Fertigungsanlage bildet die Baukammer, in der das Bauteil hergestellt wird. Wie in Abbildung 8 zu sehen ist, besteht die Baukammer in der Regel aus drei Schächten. In der Mitte befindet sich der Bauschacht, dessen Boden die Substratplatte darstellt, auf der das Bauteil aufgebaut wird. Links und rechts vom Bauschacht befindet sich die Dosier- bzw. die Überlaufeinheit. Im Dosierschacht wird das frische Pulver eingefüllt und der Überlaufschacht dient dazu, um das überschüssige Pulver aufzufangen. Das Auflegen des Pulvers erfolgt durch einen Beschichterarm, welcher abhängig vom Anlagentyp und den Bauteilanforderungen mit Beschichterklingen aus verschiedenen Werkstoffen ausgerüstet ist. In erster Linie ist dabei zwischen harten und weichen Typen zu unterscheiden. Harte Beschichter charakterisieren sich durch hohe Verschleißfähigkeit sowie konstante Beschichtungseigenschaften. Dabei kommen vorwiegend Keramiken oder HSS zum Einsatz. Für weiche Beschichter sind neben Silikonwerkstoffen und Kohlefasern für Bürstenbeschichter, auch Werkstoffe wie Nitril-Butadien-Kautschuk (NBR) für den Niedrigtemperatureinsatz in Verwendung [31].

Dabei sind die Lasereinheit besteht bei den meisten Anlagen -Modellen aus einem Nd:YAG Laser. Dieser weist eine Wellenlänge von 1,064 μm auf und liegt dadurch im nahen infraroten Bereich des Lichtspektrums. Abhängig vom Material wird in diesem Wellenlängenbereich mehr oder weniger Laserlicht absorbiert was dazu führt, dass bei einigen Werkstoffen wie zum Beispiel Kupfer eine deutlich

höhere Laserleistung notwendig ist als bei anderen Werkstoffen, um das Material aufzuschmelzen. Dies lässt sich auf die Absorptionsfähigkeit des Werkstoffes zurückführen. In Abbildung 7 sind verschiedene Phänomene gezeigt, die den Prozess beeinflussen.

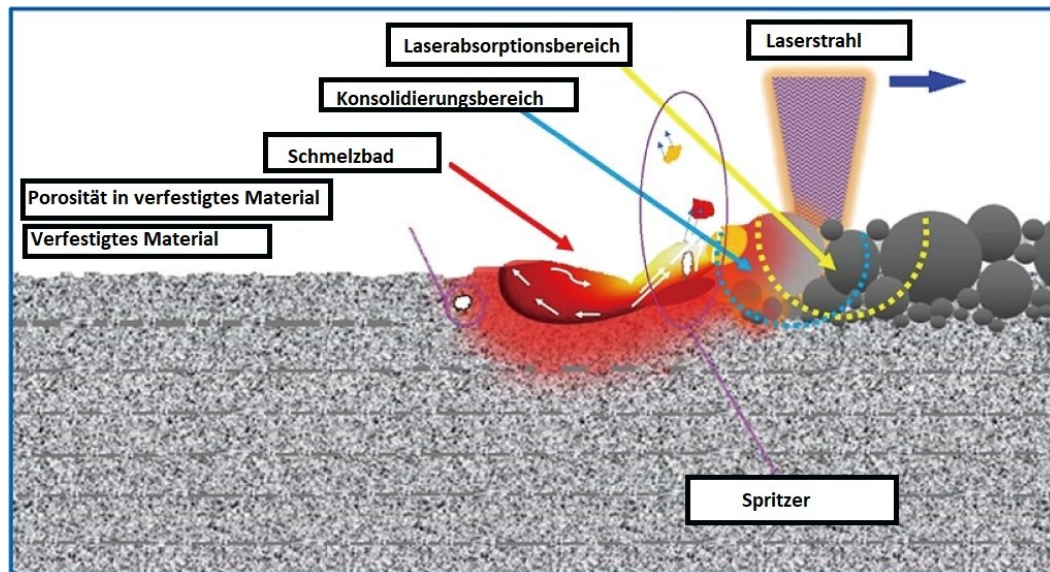


Abbildung 7: Allgemeine Darstellung des Laser-Pulverbett-Fusionsprozesses, die verschiedene Regionen und Phänomene zeigt, die wahrscheinlich in verschiedenen Arbeitsmodi des LPBF-Prozesses vorhanden sind [21].

Um ein Bauteil herzustellen, muss sichergestellt werden, dass ausreichend Pulver in den Dosierschacht gefüllt wird, da ein Nachfüllen während des Bauprozesses durch zu langen Stillstand des Baujobs zu Verzug im Bauteil führen kann. Die Bauplattform wird nach oben gefahren und mit Hilfe des Beschichters wird die erste Schicht auf die Bauplattform aufgetragen. Im Anschluss, wird die gesamte Baukammer mit Inertgas, meist Argon oder Stickstoff, geflutet. Sobald der Sauerstoffgrenzwert von 1000 ppm erreicht wird, kann der Bauprozess gestartet werden [32]. Dieser beginnt mit dem Aufschmelzen der ersten Schicht, welche meist doppelt belichtet wird um eine sichere Anbindung an die Substratplatte zu gewährleisten. Im Anschluss daran, fährt die Substratplatte eine Schichtstärke nach unten und der Zylinder der Pulverzuführung nach oben. Der Beschichter legt die zweite Schicht auf und die Belichtung startet von neuem. Diese Prozessschritte wiederholen sich bis das Bauteil fertig aufgebaut ist. Um ein gleichmäßiges Abkühlen zu gewährleisten und dadurch mögliche Spannungen zu verhindern sollte das Bauteil im Pulverbett abkühlen bevor es entpackt und von allen Pulverresten befreit werden kann.

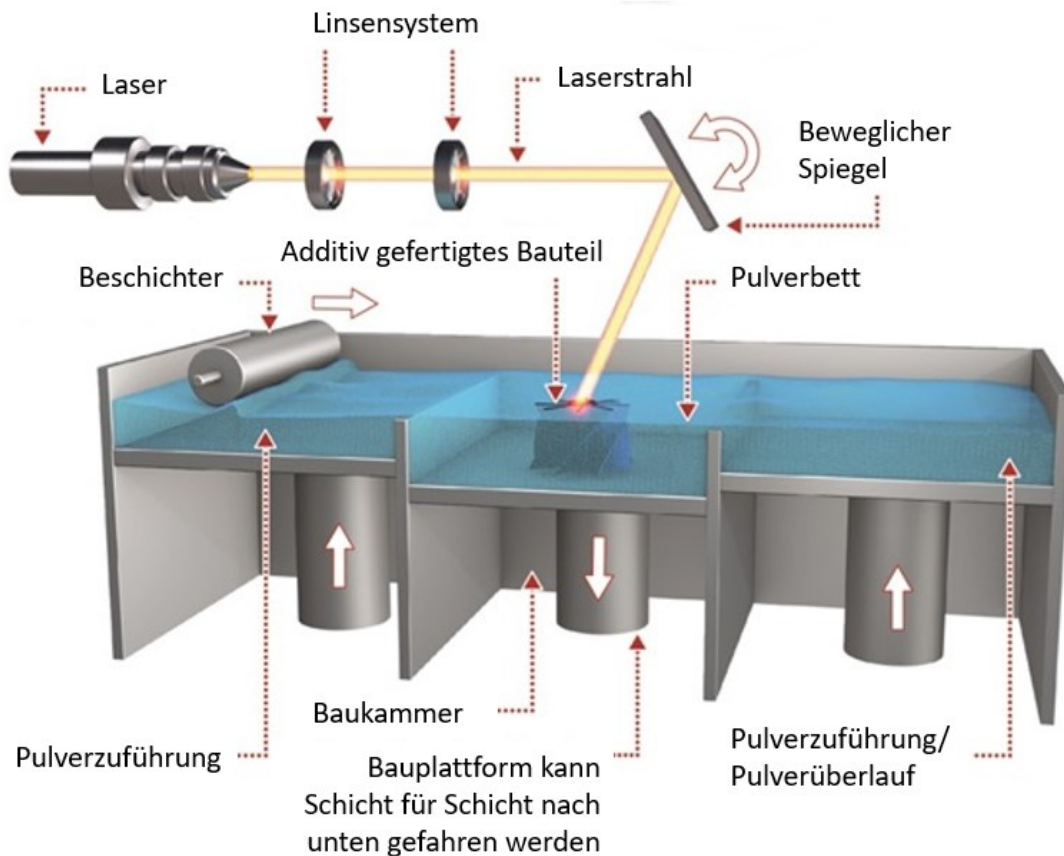


Abbildung 8: Schematische Darstellung von LPBF Prozess [33]

Die Bauteile werden von der Substratplatte getrennt und gegebenenfalls von Stützstrukturen befreit. Je nach Anforderungen können im Anschluss herkömmliche Nachbearbeitungsschritte wie Drehen, Fräsen oder Oberflächenbehandlungen durchgeführt werden. Um ein Metallpulver im LPBF- Prozess zu verarbeiten, ist es notwendig die richtigen Prozess- und Belichtungsparameter zu ermitteln. Meist kann beim Kauf von kommerziellen Anlagen und der Verwendung entsprechend zertifizierter Metallpulver, die dazugehörigen Parameterdatensätze miterworben werden. Diese garantieren ein dicht gebautes Bauteil mit erforderlichen mechanischen Eigenschaften. Diese Parameterdatensätze können sich je nach Anforderung unterscheiden [34]. Für eine hohe Oberflächenqualität und Detailgenauigkeit wird eine geringe Schichtstärke bevorzugt was jedoch zu einer hohen Anzahl der Schichten und einer hohen Bauzeit führt. Dies wiederum spiegelt sich im Bauteilpreis wider, wie in Kapitel 1.2 erwähnt. Für grobe Bauteile, oder Bauteile die mechanisch nachbearbeitet werden müssen, können höhere Schichtstärken eingesetzt werden. Neben dem Rohmaterial wird die Qualität des fertigen Bauteils von einer Vielzahl von Parameter beeinflusst. Für eine Parameterstudie im LPBF-Prozess sind folgende Parameter wesentlich:

Die **Laserleistung (P)** ist maßgeblich für den Schmelzprozess. Die Energie, welche notwendig ist um das Pulver aufzuschmelzen, ist hauptsächlich abhängig von den Materialeigenschaften des Pulvers wie der Absorption.

Die **Schichtstärke (t)** wird durch das Absenken der Bauplattform definiert und schreibt vor in wie viele Schichten das Bauteil zerlegt wird. Abhängig von den Anforderungen an das Bauteil, reichen die Schichtstärken von 20 – 100 μm .

Der **Hatchabstand (h)** beschreibt den Abstand zwischen den Mittellinien zweier Laserbahnen. Um sicherzustellen, dass das gesamte Pulver aufgeschmolzen wird, müssen sich die resultierenden Schmelzbahnen überlappen, siehe Abbildung 9.

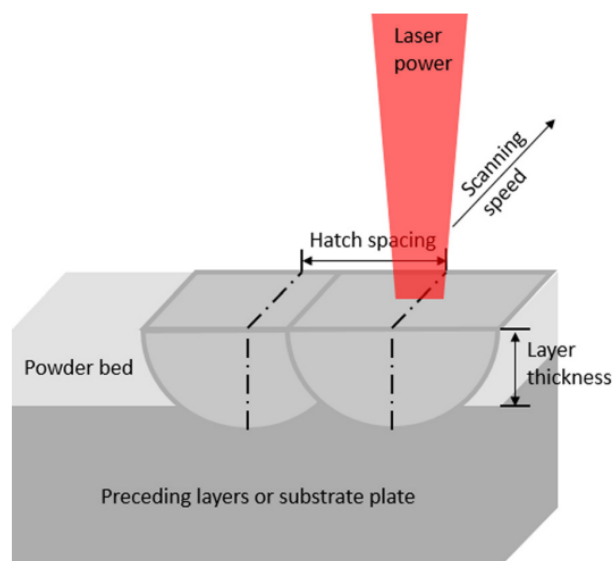


Abbildung 9: SLM Prozess Parameter: Schichtstärke, Hatch- Abstand, Scangeschwindigkeit, Laserpower [35]

Die **Scangeschwindigkeit (v)** ist jene Geschwindigkeit mit der sich der Laser über das Pulverbett bewegt. Für die Art wie der Laser die zu schmelzenden Bereiche abfährt gibt es verschiedenen Vorgehensweisen. Am häufigsten werden jedoch die Schachbrettbelichtung oder die Streifenbelichtung (Abbildung 10) eingesetzt [36].

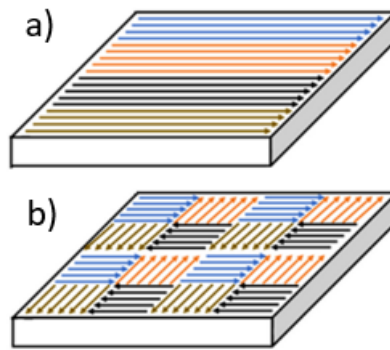


Abbildung 10: Vergleich a) Streifenbelichtung und b) Schachbrettelichtung [37]

Für eine quantitative Bewertung der Parametereinstellungen lässt sich die Laserenergiedichte E (J/mm^3) mit folgender Formel berechnen [38]:

$$E = \frac{P}{v \cdot t \cdot h} \quad [\text{J}/\text{mm}^3] \quad (1)$$

Hierbei beschreibt P die Laserleistung mit der Einheit [W], v die Lasergeschwindigkeit mit der Einheit [mm/s], t beschreibt die Schichtstärke in [mm] und h den Hatch-Abstand ebenfalls in [mm]. Die zum Schmelzen erforderliche Energiedichte hängt von den thermo-physikalischen und optischen Eigenschaften des Materials ab auf welche hier nicht weiter eingegangen wird.

Um die passenden Parametereinstellungen zu finden, ist es notwendig den Zusammenhang der einzelnen Parameter und den Einfluss dieser auf die Energiedichte zu verstehen. In Abbildung 11 ist dieser Zusammenhang zwischen Laserleistung und Scangeschwindigkeit dargestellt und welche Auswirkungen im Schmelzbad zu erwarten sind:

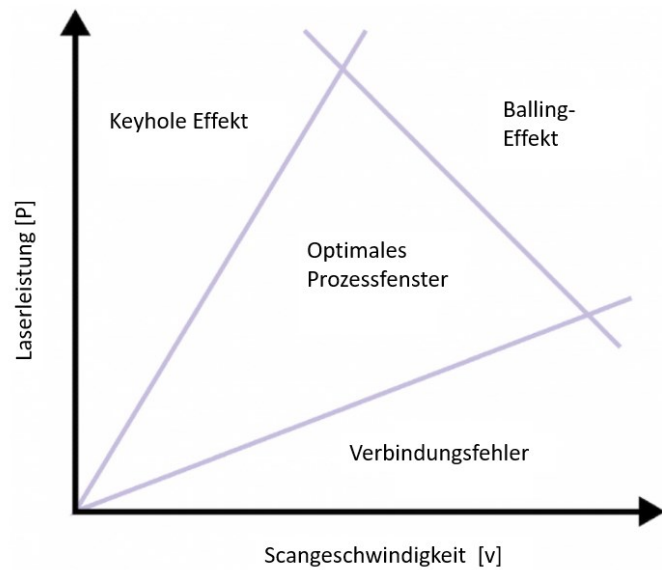


Abbildung 11: Zusammenhang von Laserleistung und Scangeschwindigkeit und deren Auswirkung auf das Bauteil [39]

In Abbildung 12 sind die Auswirkungen dargestellt, wenn die Prozessparameter außerhalb des Arbeitsfensters liegen. In Abbildung a) und c) ist zu erkennen, dass sich durch einen zu hohen Energieeintrag ein sogenanntes Keyhole bildet. Dabei dringt der Laser zu tief in das Metall unter der Pulverschicht ein. Durch interne Reflexionen der Laserenergie im Hohlraum wird mehr Wärme tiefer im Material eingeschlossen, was zu einem länger anhaltenden Schmelzbad führt. Wenn das Schlüsseloch instabil wird, kann das Schmelzbad im Hohlraum kollabieren und eine Pore aus Inertgas bilden. Solche Poren schließen sich bei der Erstarrung möglicherweise nicht und führen dadurch zu Hohlräumen im fertigen Bauteil. In Abbildung b) ist die Auswirkung einer zu geringen Laserenergie dargestellt. Die geringere Laserleistung führt zu weniger Turbulenzen und dadurch zu weniger Spritzer, da das Schmelzbad schneller erstarrt. Jedoch kann es sein, dass die geringere Laserenergie nicht tief genug in das Pulverbett eindringt, was dazu führt, dass nur die Oberfläche des Metallpulvers aufschmilzt. Unter dem Schmelzbad wird das nicht-aufgeschmolzene Pulver zurückgelassen, was zu Poren im Bauteil führt. In Abbildung 12 d) ist der Einfluss einer zu hohen Scangeschwindigkeit dargestellt. Bei zu hohen Lasergeschwindigkeiten kann das Schmelzbad instabil werden und dadurch hohe Oberflächenspannungsgradienten hervorrufen. Die Oberflächenspannungsgradienten treiben die Schmelze in Richtung eines minimalen Energiezustands. Das heißt, dass die Schmelze zu Schmelzseen zerfällt und einzelne kugelförmige Tropfen bildet, auch bekannt als Balling Phänomen [39; 40]

All diese Szenarien führen zu einer Minderung der Festigkeit und dadurch zu fehlerhaften Bauteilen.

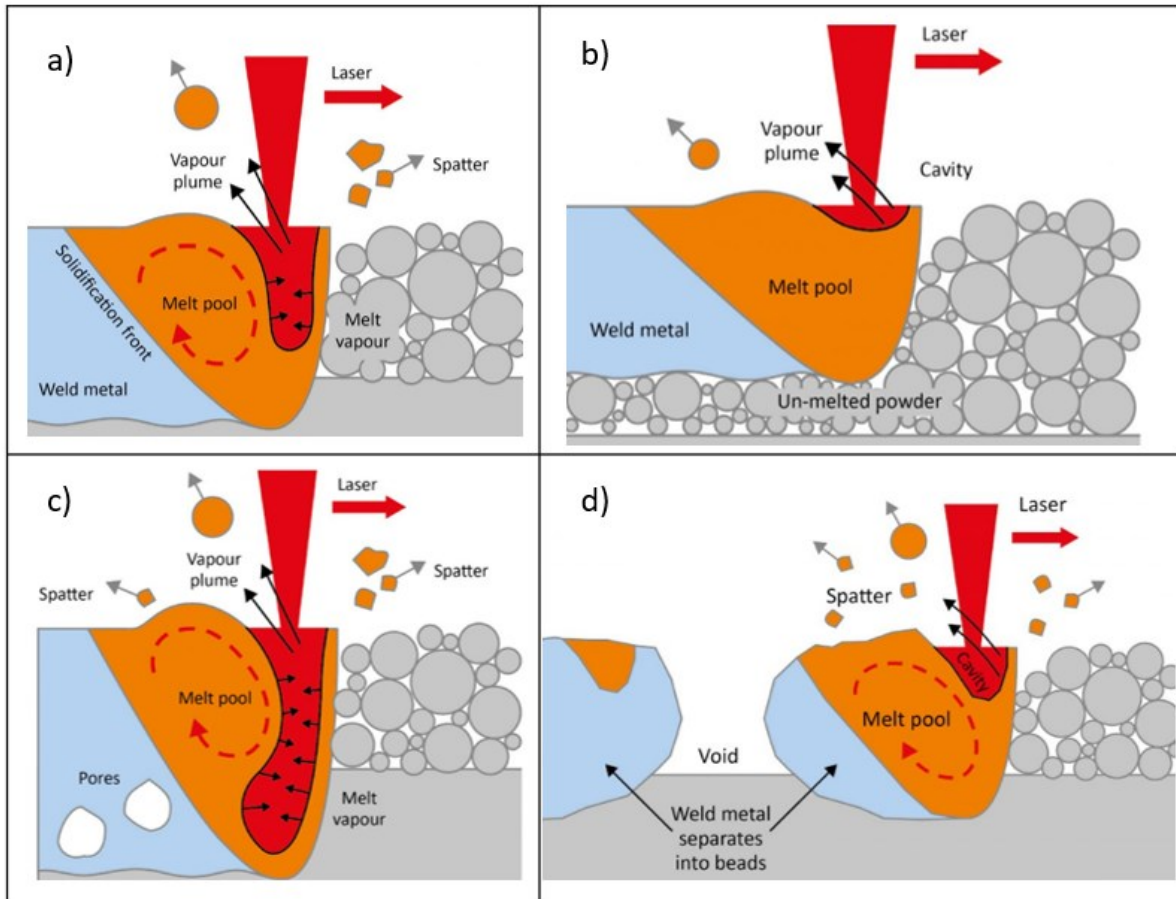


Abbildung 12: Auswirkungen der Prozessparameter außerhalb des Betriebsfensters [39]

Somit liegt der Sinn einer Parameterstudie darin, Belichtungsparameter zu finden, die zu einer Bauteildichte von >99% der herkömmlichen Bauteildichte führen und eine adäquate Oberflächenbeschaffenheit garantieren [23]. In Abbildung 13 ist die durchschnittliche Oberflächenrauheit der verschiedenen Druckverfahren dargestellt [41].

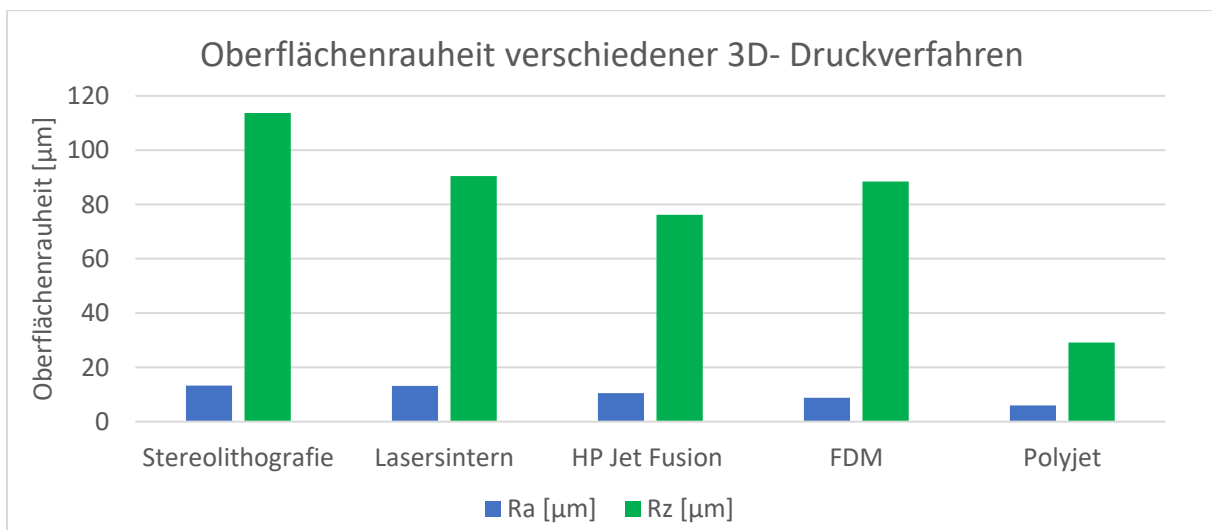


Abbildung 13: Oberflächenrauheit verschiedener 3D- Druckverfahren [41]

Um die passenden Prozessparameter für einen Werkstoff zu finden, werden verschiedene Varianten aus Laserleistung, Lasergeschwindigkeit und Hatch-Abstand getestet. Der erste Schritt einer Prozessparameterstudie hat das Ziel die Grenzen des optimalen Prozessfensters zu finden. Dabei wird jeweils einer der Parameter verändert und die restlichen konstant gehalten. Wenn die Schichtstärke und der Hatch-Abstand konstant sind, ergibt sich eine Matrix aus verschiedenen Kombinationen von Laserleistung und Scangeschwindigkeit. Eine schematische Darstellung einer Parameterstudie ist in Abbildung 14 zu finden.

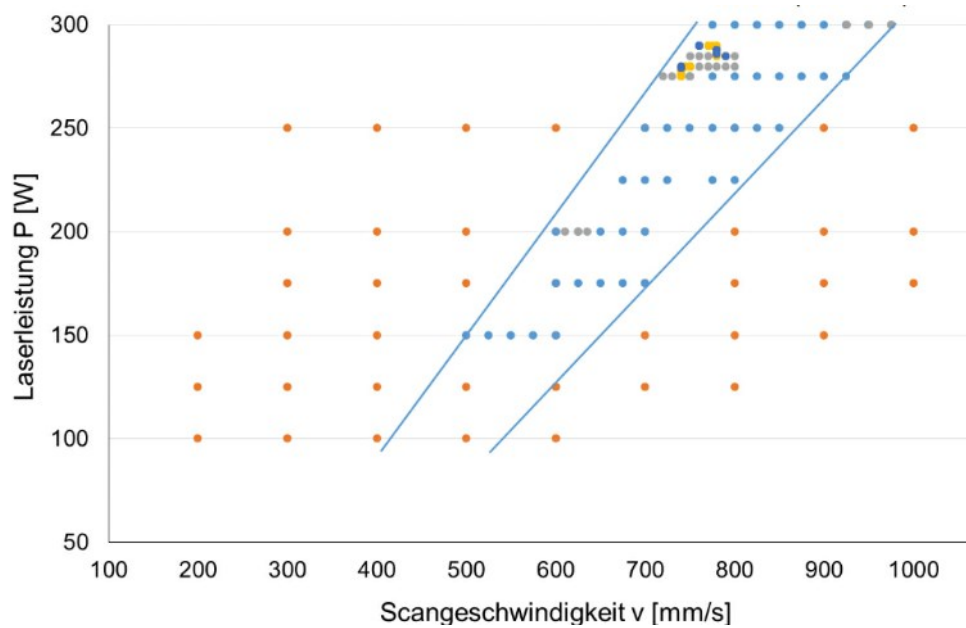


Abbildung 14: Parameterstudie für Kunststoffformenstahl [42]

Es werden einzelne Bahnen mit den unterschiedlichen Prozessparameterkombinationen (orange Punkte) aufgeschmolzen. Anhand dieser Bahnen können bereits Aussagen über die Qualität des Schmelzbades und Oberfläche getroffen werden. In *Abbildung 15* sind sechs unterschiedliche Bahnen ersichtlich. Bei den unteren drei Bahnen ist deutliches Balling zu erkennen (rote markiert), was die Parameterkombination unbrauchbar macht.

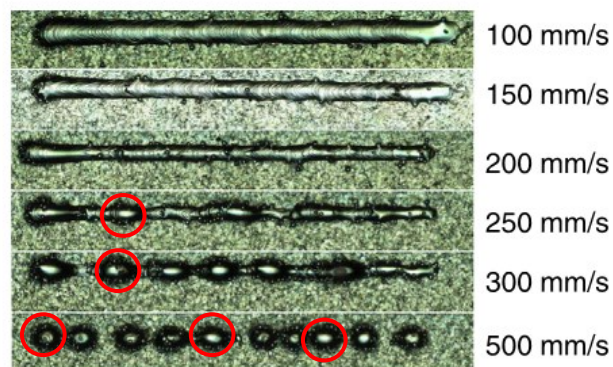


Abbildung 15: Schweißbahnen einer Prozessparameterstudie - Beispiel [43]

Damit ergibt sich der Bereich zwischen den blauen Linien. Es zeichnet sich bereits deutlich ein Prozessfenster ab. In der zweiten Versuchsreihe werden feinere Abstufungen von Scangeschwindigkeit und Laserleistung getestet, wie in *Abbildung 14* mit den blauen Punkten gekennzeichnet ist. Die erneute Auswertung und immer feiner werdende Abstufung führt schlussendlich auf eine geringe Anzahl an Prozessparameterkombinationen [42]. Um den Aufwand einer Prozessparameterstudie zu minimieren kann auf eine statistische Versuchsplanung zurückgegriffen werden. Die Design of Experiments Methode (DoE) verringert nicht nur den Versuchsaufwand, sondern gibt auch viel über die Zusammenhänge der Einflussvariablen auf die Ergebnisse preis [43].

Mit der getroffenen Vorauswahl an Parametern werden meist würfel- oder zylinderförmige Proben gedruckt. Um die relative Bauteildichte der Proben zu ermitteln, werden die Proben in mehrere Schnittebenen geteilt um Informationen von unterschiedlichen Ebenen zu erhalten [23]. Die geteilten Proben werden eingebettet, geschliffen und poliert. Mit Hilfe eines Auflichtmikroskops werden die Proben im Anschluss auf Poren untersucht. Das dichte Material erscheint weiß, Gasporen hingegen als schwarze kreisförmige Punkte und prozessinduzierte Poren als unregelmäßige schwarze Flächen. Ein Beispiel ist in *Abbildung 16* dargestellt.

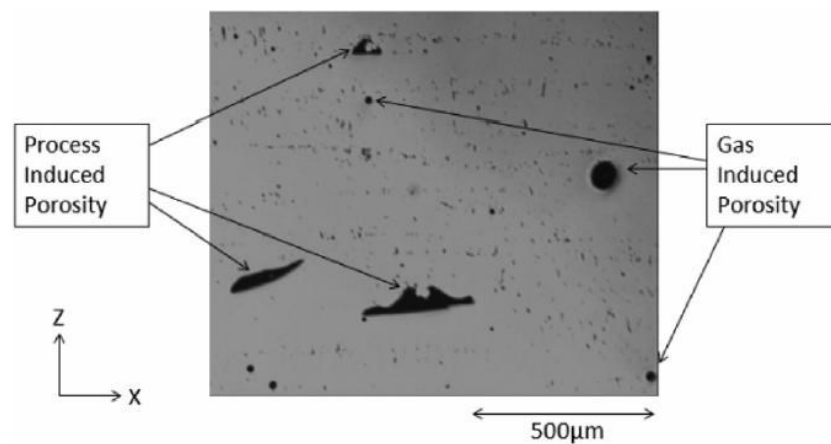


Abbildung 16: Beispielbild Porenauswertung [44]

Ein Bildauswertungsprogramm wertet die weißen und schwarzen Anteile aus (Phasenanalyse), wodurch eine Aussage über die relative Dichte des Probekörpers gemacht werden kann. Mit den Prozessparametern der Proben mit der höchsten Dichte, werden Prüfkörper für die Bewertung der Oberfläche des Bauteils oder für etwaige mechanische Untersuchungen erstellt. Eine maßgebliche Kenngröße zur Bewertung der Bauteiloberfläche ist die Down-Skin-Oberfläche. Diese beschreibt die während des Baujobs nach unten gerichtete Fläche eines Bauteils und ist in *Abbildung 17* schematisch dargestellt.

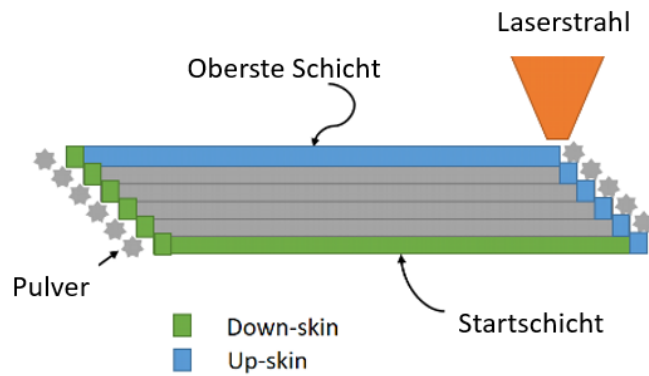


Abbildung 17: schematische Darstellung von Down-skin und Up-skin [45]

2.4. LPBF-Prozess für Inconel 718

In zahlreichen Studien wurde das mechanische Verhalten von additiv gefertigtem IN718 (AM-IN718) untersucht [46]. Da der Werkstoff ohne Ausscheidungshärten nur selten eingesetzt wird, sind die mechanischen Kennwerte nach den Wärmebehandlungen von größerer Bedeutung. Sowohl für den as-built Zustand, als auch für den wärmebehandelten Zustand liegen die Festigkeitswerte von additiv hergestellten IN718- Bauteilen zwischen den Werten der Guss- und den Knetlegierungen. Abhängig von vom Einsatz werden Guss- bzw. Knetlegierungen unterschiedlichen Wärmebehandlungen unterzogen, um bei Gusslegierungen gute Fließeigenschaften hervorzurufen und bei Knetlegierungen eine gute Umformbarkeit einzustellen. Die höhere Festigkeit in der additiven Fertigung im Vergleich zu seiner gegossenen Version wird hauptsächlich auf die erzeugte feine Mikrostruktur zurückgeführt. Andererseits wurde das Vorhandensein von Porosität als Hauptgrund für die schlechteren Eigenschaften von AM-IN718 im Vergleich zu Knetlegierungen genannt. [22; 47] Die typischen Festigkeitskennwerte für ein additiv gefertigtes Bauteil sind in Tabelle 3 angeführt. Es ist jedoch anzumerken, dass es sich um Mittelwerte handelt, da die Festigkeitskennwerte abhängig von der Bauchrichtung sind.

Tabelle 3: Mechanische Kennwerte für Inconel718 Bauteile [29; 46]

Prozess	Zugfestigkeit [MPa]	Streckgrenze [MPa]	Bruchdehnung [%]	Härte [HRC]
<i>As built</i>	965	655	35	31
<i>Wärmebehandelt AMS 5662</i>	1427	1207	18	46
<i>Wärmebehandelt AMS 5664</i>	1434	1172	21	45
<i>Knetlegierungen</i>	1230	1030	12	30-50
<i>Gusslegierungen</i>	909	650	10	28

Um die Reproduzierbarkeit und die Prozesssicherheit gewährleisten zu können, werden folgende chemische und mechanische Untersuchungen durchgeführt.

Chemische Zusammensetzung

Um die chemische Zusammensetzung des Bauteils zu bestimmen, können verschiedene Verfahren herangezogen werden. Eine Methode ist die energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX). Die Atome werden mittels Elektronenstrahl angeregt was dazu führt, dass ein Atom aus einer der inneren Schalen herausgeschlagen wird. Die wird Röntgenstrahlung freigesetzt, welche für das jeweilige Element charakteristisch ist und somit Aufschluss über die Zusammensetzung der Probe gibt. Dieses Verfahren kann entweder punktuell oder über einen festgelegten Bereich durchgeführt werden [48]. Eine weitere Methode zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung ist die nasschemische Analytik. Dabei wird über eine Reaktion in einer Reagenzlösung die Masse bzw. das Volumen eines Stoffes bestimmt [49].


Porositätsbestimmung

Ein immer noch weit verbreitetes Problem der additiven Fertigung ist die Porenbildung während des Bauprozesses. Zur Ermittlung von innen liegenden Poren, wird ein metallographischer Schliff der gedruckten Proben erstellt. Die Proben werden in ein Trägermedium eingebettet, geschliffen und poliert. Mit Hilfe eines Mikroskops können dadurch die dunklen Hohlräume sichtbar gemacht und mit einem Bildanalyseverfahren ausgewertet werden [23].

Gefüge-Analyse

Um die Mikrostruktur der Bauteile sichtbar zu machen, werden Ätzmittel eingesetzt. Je nachdem ob eine Korngrenzätzung oder eine Kornflächenätzung erwünscht ist, werden unterschiedliche Ätzmittel eingesetzt. Die für Inconel718 eingesetzten Ätzmittel sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 4: Ätzmittel für Inconel718 [50]

Name	Zusammensetzung	Darstellung	
IN718	75ml Ethanol 25ml HCl 2,5ml H ₂ O ₂	Korngefüge, γ-Phase, Karbidphasen	

Beraha III	100ml H ₂ O 200ml HCl 25g Ammoniumhydrogendifluorid Auf 100ml Lösung 1g Kaliumdisulfid	Kornflächen	
Kalling's / Adler	1 Teil Adler 1 Teil Kalling's	Korngrenzen, Korngefüge, Karbidphasen	
GPE- Ätzung	Stammlösung aus H ₂ O, HCl, MoO ₃ Auf 60 ml Lösung: 50ml H ₂ O 30ml HNO ₃ 4-5 Tropfen Netzmittel	γ'- Ausscheidungen	

Bestimmung von Festigkeitskennwerten

Die mechanischen Kennwerte, wie Zugfestigkeit, Streckgrenze, Dehngrenze können mit einem Zugversuch bestimmt werden. Die nachbearbeiteten Proben, welche nach einer Norm gefertigt werden, werden eingespannt und mit einer axial angreifenden Kraft auseinandergezogen. Eine weitere Methode bietet die DIN SPEC 4864. Diese Prüfmethode ermöglicht es durch einen Härteeindruck und einem softwarebasierten Abgleich von FEM-Simulationen, Aussagen über Streckgrenze, Zugfestigkeit Dehngrenze und Härte zu erhalten. Härte, Verformbarkeit durch Biegeversuch oder auch der Widerstand gegen dynamische Beanspruchung sind weitere mechanische Kennwerte die bestimmt werden können. [51; 23]

2.5. Anforderungen an Pulverwerkstoff

Ausgangsmaterial für den AM-Prozess ist Metallpulver, welches durch verschiedene Zerstäubungstechniken hergestellt werden kann. Beispiele für die Herstellverfahren sind die Gaszerstäubung, die Rotationszerstäubung oder die Plasmazerstäubung. Abhängig von der Art der Zerstäubung weisen die Pulver unterschiedliche Formen auf welche von unregelmäßigen Formen bis zu nahezu perfekt sphärischen Formen reichen Als Zerstäubungsmedium für die Gaszerstäubung wird

Inertgas verwendet um Reaktionen mit dem Material zu minimieren. Jedoch kann es sein, dass während dem Erstarrungsprozess Gas in die Partikel eingeschlossen wird. Dieses eingeschlossene Gas wird anschließend bei der Verarbeitung des Pulvers durch die schnelle Erstarrung auf das Bauteil übertragen und führt zu pulverbedingter Porosität im Werkstoff. Diese Poren sind kugelförmig und entstehen durch den Dampfdruck des eingeschlossenen Gases. Deshalb ist es von Vorteil möglichst porenfreies Pulver zu verwenden. Die Qualität des Pulvers wird oft durch physikalische Kennwerte wie der Fließfähigkeit, der Schüttdichte und der Sphärizität bestimmt. Auch die Morphologie gibt Aufschluss über die Qualität des Pulvers [52]. Eine weitere wichtige Prozessgröße ist die Partikelgrößenverteilung. Diese stellt sicher, dass weder zu viel noch zu wenig Energie vom Pulver absorbiert und dadurch eine zu geringe bzw. zu hohe Energiedichte in das Material eingetragen wird [53].

3. Methodenplanung

Untersuchungen zum Pulverwerkstoff

Die chemische Zusammensetzung der Legierung wird mittels nass-chemischen Prüfverfahren bestimmt und verglichen ob die Werte mit den Toleranzgrenzen der Spezifikation übereinstimmen. Des Weiteren wird die Partikelgrößenverteilung mit dem Camsizer analysiert. Die Schüttdichte und die Fließfähigkeit werden mit Hilfe eines Hall-flowmeters bestimmt. Durch ein Rasterelektronenmikroskop wird das Pulver auf Satellitenbildung und Agglomerate untersucht.

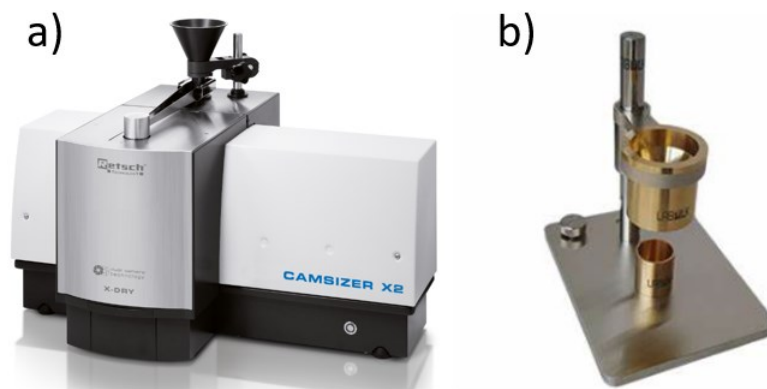


Abbildung 18: a) Camsizer zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung; b) Hall-flowmeter

Parameterstudie

Um zu ermitteln, ob Inconel718 auch bei Erhöhung der Schichtstärke zu dichten Bauteilen führt, wird eine Parameterstudie für den LPBF-Prozess durchgeführt. Die Schichtstärke wird von 40µm auf 80µm erhöht und die dazugehörigen Parameter wie Lasergeschwindigkeit, Laserleistung und Hatch-Abstand, angepasst. Die Proben werden in Zusammenarbeit mit der Firma Fuchshofer Advanced Manufacturing

– FAM GmbH hergestellt. Als Versuchsanlage wird eine EOSINT M290 der Firma EOS GmbH verwendet. Die Maschine verfügt über einen Bauraum von 250x250x325 mm³. Der Yb- Faserlaser Laser weist eine Maximalleistung von 400 W sowie einen Fokusbereich von 100µm auf. Es werden würfelförmige Proben mit einer Kantenlänge von 20mm hergestellt und im Anschluss mit einer Metallbandsäge (Elmag – HY 230 VARIO) von der Bauplattform getrennt. Die CAD- Zeichnung der Probewürfel ist in Abbildung 19 dargestellt.

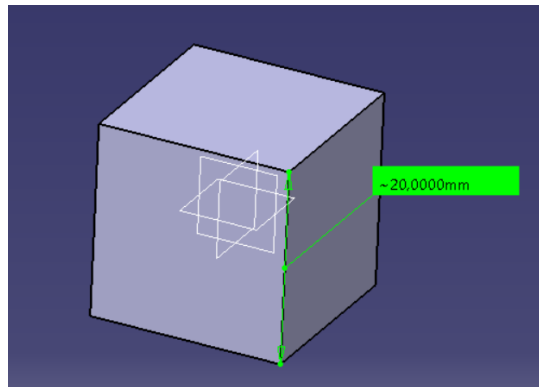






Abbildung 19: Probewürfel mit 20 mm Kantenlänge

Zur Präparation der Proben werden die in Tabelle 5 angeführten Geräte eingesetzt. Mit Hilfe einer Trennmaschine werden die Proben halbiert und eine Hälfte davon mit der Einbettpresse in Bakelit, einem hitzeresistenten, duroplastischen Kunststoff, eingebettet. Im Anschluss werden die Proben mit SiC- Schleifpapier, mit einer Körnung von 180 bis 1200 geschliffen und mit einem Poliertuch der Firma Struers und einer 3µm bzw. 1µm Diamantsuspension poliert.

Tabelle 5: verwendete Geräte für metallographischen Schliff

<p>a) Trennmaschine Brilliant 221 ATM GmbH</p>	<p>b) Einbettpresse CitoPress 10 Struers GmbH</p>
	

<p>c) Schleif – und Poliergerät Saphir 550 mit Polierkopf ATM GmbH</p>	<p>d) Mikroskop BX53M Olympus</p>
	

Mittels Auflichtmikroskops werden Bilder in verschiedenen Vergrößerungen erstellt. Zur Auswertung der Porosität wird das Bildanalyseprogramm ImageJ® verwendet. Die Probe mit der höchsten Dichte und die Referenzprobe werden im Anschluss einer Wärmebehandlung unterzogen. Nach der Norm AMS 5662 werden die Proben bei 970°C eine Stunde geglüht und im Anschluss auf Raumtemperatur abgekühlt. Danach wieder auf 720°C aufgeheizt und für 8 Stunden gehalten. Mit 50°C pro Stunde wird auf 620°C weiterabgekühlt und weitere 8 Stunden lang gehalten. Nach dieser Wärmebehandlung kann die Probe auf Raumtemperatur auskühlen. In Abbildung 20 ist der Verlauf der Wärmebehandlung schematisch dargestellt.

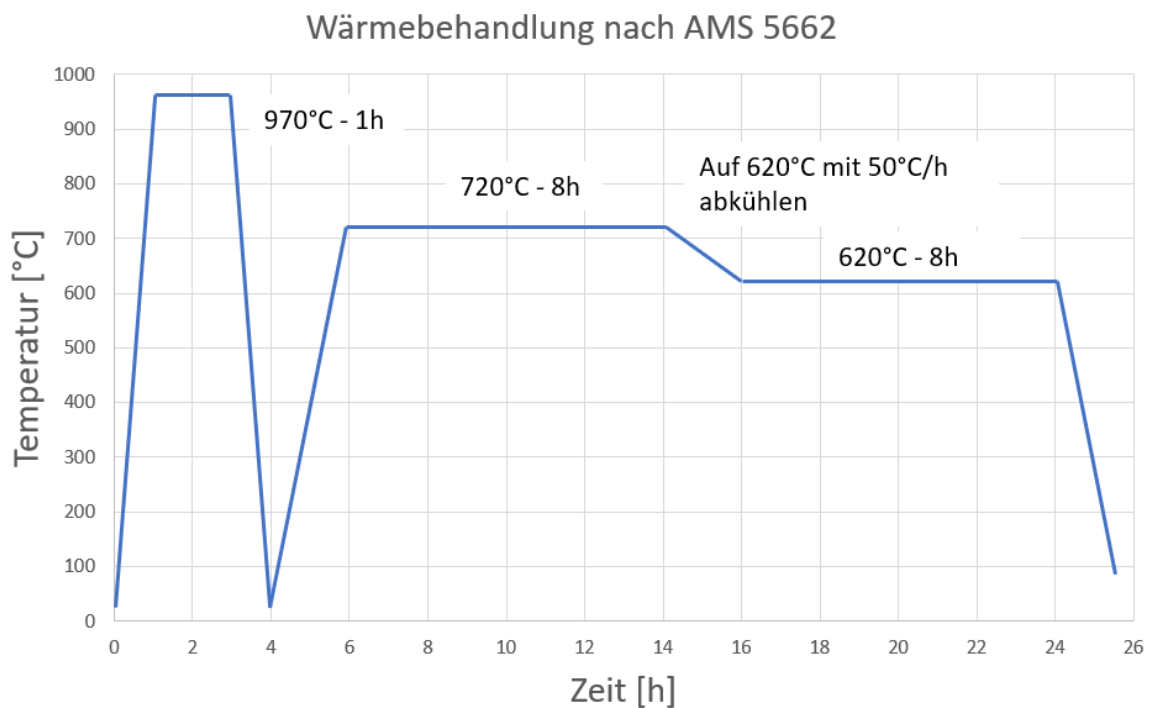


Abbildung 20: Verlauf der Wärmebehandlung nach AMS 5662

Mechanisch – technologische Untersuchungen

Zur Ermittlung der Festigkeitswerte wird die Prüfmethode nach DIN SPEC 4864 angewandt. Die Untersuchung wird in Zusammenarbeit mit der Firma Imprintec - Material Testing Solution durchgeführt. Es wird das Gerät i3D mBV zur Bestimmung der Zugversuchs- Kennwerte und gleichzeitiger Härtebestimmung verwendet. Es wird auf eine Last von 60kg zugeführt und über den Härteeindruck die mechanischen Kennwerte bestimmt. Dies wird jeweils für die ausgewählte Probe und für die Referenzprobe im as-built und wärmebehandelten Zustand durchgeführt.

Wirtschaftliche Betrachtung - Berechnung der Produktionskosten

Die Firma Fuchshofer hat freundlicherweise die Aufstellung der Kosten zur Herstellung eines Bauteils mittels additiver Fertigung und auch mittels konventioneller Fertigung bereitgestellt. Die Herstellkosten für die additive Fertigung lassen sich folgendermaßen unterteilen:

$$\begin{aligned} K(AM) = & \textit{Materialkosten} + \textit{Manipulationsgebuehr} + \textit{Pre und Post Processing} \\ & + \textit{Prozessvorbereitung} + \textit{Druckjob} \\ & + \textit{Nachbearbeitung} (+\textit{Fremdvergabe CNC Bearbeitung} + \textit{Einsteller}) \end{aligned}$$

Die Berechnung der Kosten für eine konventionelle Herstellung lässt sich folgendermaßen durchführen:

$$\begin{aligned} K(K) = & \textit{Materialkosten} + \textit{Rüstzeit und Laufzeit (Fräsen)} \\ & + \textit{Rüstzeit und Laufzeit (Drehen)} + \textit{Arbeitsvorbereitung} + \textit{Einsteller} \\ & + \textit{Werkzeug} + \textit{Sonstiges (Manipulation, Zuschnitt,..)} \end{aligned}$$

Im ersten Schritt werden die Produktionskosten für die additive Herstellung eines Bauteils mit einer 40µm-Schichtstärke und einem Bauteil mit 80µm-Schichtstärke verglichen. Des Weiteren werden für dasselbe Bauteil die Herstellungskosten durch eine konventionelle Fertigung berechnet und denen der additiven Fertigung gegenübergestellt.

4. Versuchsdurchführung

4.1. Pulvercharakterisierung

Für diese Arbeit wurde von der Firma **Metalpine GmbH** 50 kg In718-Pulver zur Verfügung gestellt mit einer chemischen Zusammensetzung laut Tabelle 6. Alle gemessenen Werte liegen innerhalb der Toleranzgrenzen.

Tabelle 6: chemische Zusammensetzung des verwendeten Werkstoffes

	Ni	Cr	Nb	Mo	Ti	Co	Al	Si	Mn	andere	Fe
Min. [Gew.-%]	50,0	17,0	4,75	2,8	0,65	-	0,2	-	-	-	Gleichgewicht
Max. [Gew.-%]	55,0	21,0	5,5	3,3	1,15	1,0	0,8	0,35	0,35	0,5	Gleichgewicht
Messung	50,3	20,2	5,49	3,26	0,79	0,01	0,33	0,07	0,01	< 0,5	Gleichgewicht

Die Partikelgrößenverteilung, wie in Abbildung 21 dargestellt, liegt im Bereich von 20-53µm.

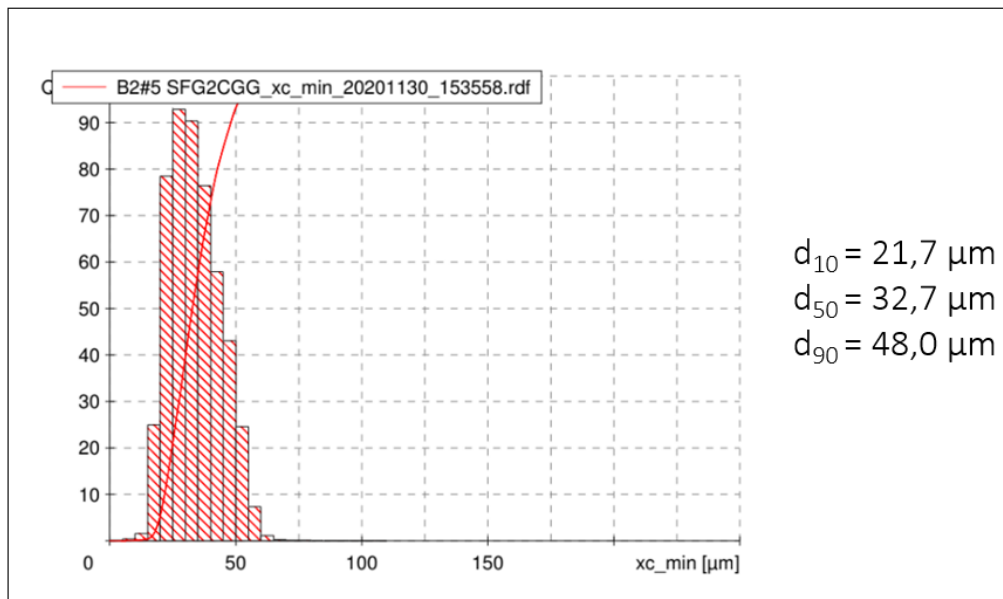


Abbildung 21: Partikelgrößenverteilung des verwendeten Pulvers

Abbildung 22 zeigt die Morphologie des Pulvers in 1000- und 3000-facher Vergrößerung. An den Partikeln können kaum Satelliten gefunden werden und es sind keine Anhaftungen zu erkennen.

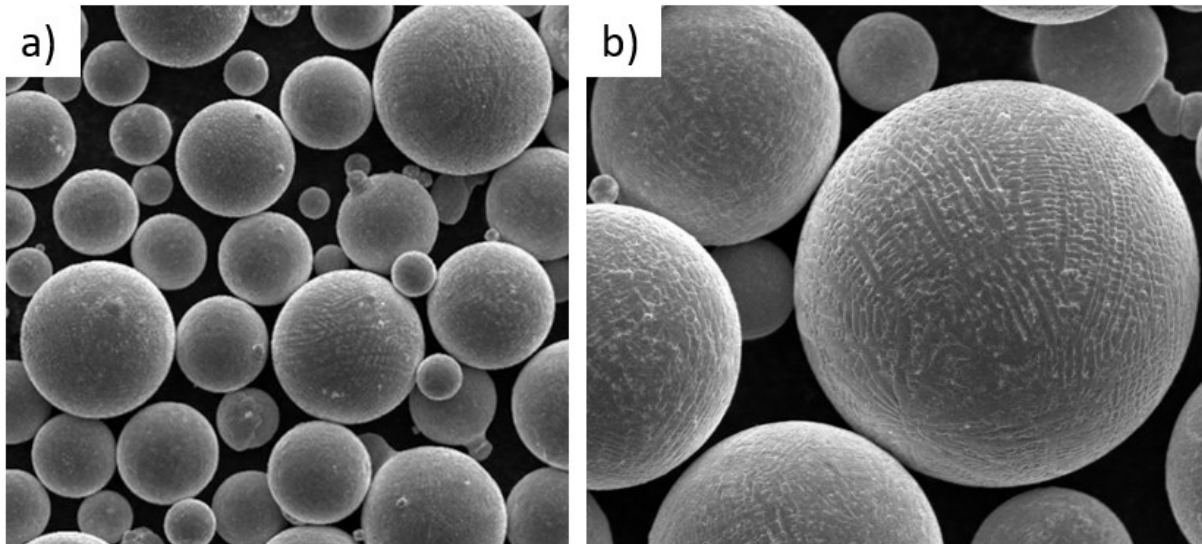


Abbildung 22: Morphologie des verwendeten In718- Pulvers - a) 1000x, b) 3000x vergrößert

Die Fließfähigkeit des Pulvers wurde mit Hilfe eines Hall Flowmeters (nach ASTM B213) gemessen und liegt bei 11 Sekunden für 50g. Die Schüttdichte liegt bei $4,85 \text{ g/cm}^3$ und wurde ebenfalls mit einem Hall-Flowmeter, angelehnt an die ASTM B212 bestimmt. Da für die additive Fertigung ein einwandfreies Pulver vorausgesetzt wird, sind die oben genannten Untersuchungen unumgänglich. Die hohe Sphärizität und das Ausbleiben von Anhaftungen erleichtern das Auftragen der Pulverschicht.

4.2. Parameterstudie

Die Auswahl der Werte für den Parameterdatensatzes erfolgte über Erfahrungswerte einer Parameterstudie eines ähnlichen Werkstoffes für $80\mu\text{m}$ Schichtstärke. Es wurde auch bei dieser Parameterstudie die Schichtstärke auf $80\mu\text{m}$ erhöht und die Laserleistung, der Hatch- Abstand und die Lasergeschwindigkeit verändert. Dabei wurden die Datensätze der besten Ergebnisse als Grundlage für die neue Parameterstudie verwendet. In der folgenden Tabelle sind die Einstellungen für die erste durchgeführte Parameterstudie dargestellt.

Tabelle 7: Parameterauswahl für erste Versuchsreihe

Proben- bezeichnung	Schicht- stärke [μm]	Laserleistung [W]	Laser Geschwindigkeit [mm/s]	Hatch- Abstand [mm]	Volumenenergie [J/mm^3]
1.01	80	340	790	0,11	48,90
1.02	80	340	837,5	0,11	46,13
1.03	80	350	825	0,11	48,21
1.04	80	350	850	0,11	46,79
1.05	80	350	800	0,115	47,55

1.06	80	350	830	0,115	45,83
1.07	80	350	770	0,12	47,35
1.08	80	350	790	0,12	46,15
1.09	80	345	715	0,125	48,25
1.10	80	345	755	0,125	45,70
REF	40	285	960	0,11	67,47

Die Proben wurden bei der Firma Fuchshofer Advanced Manufacturing – FAM GmbH hergestellt. Mit den gewählten Parametern laut Tabelle 7 wurden 10 Würfel mit einer Kantenlänge von 20 mm gedruckt. Als Referenz und Hilfestellung bei der Auswertung wurde eine Probe mit den herkömmlichen Parametern für eine Schichtstärke von 40µm mitgedruckt. Die Proben wurden mit einer Bandsäge von der Bauplattform abgetrennt. Danach wurden die Würfel mit der Trennmaschine (ATM Brilliant 221) halbiert und mit einer Einbettpresse (Struers CitoPress-10) in Bakelit eingebettet. Die eingebetteten Proben wurden mit Schleifpapier mit unterschiedlichen Körnungen zwischen 230 und 1200 geschliffen. Im Anschluss wurden die Proben mit einem Poliertuch und einer Diamantsuspension solange poliert bis sich eine spiegelige Oberfläche eingestellt hat. In Abbildung 23 a) ist ein Probekörper und in b) die eingebetteten Proben dargestellt.

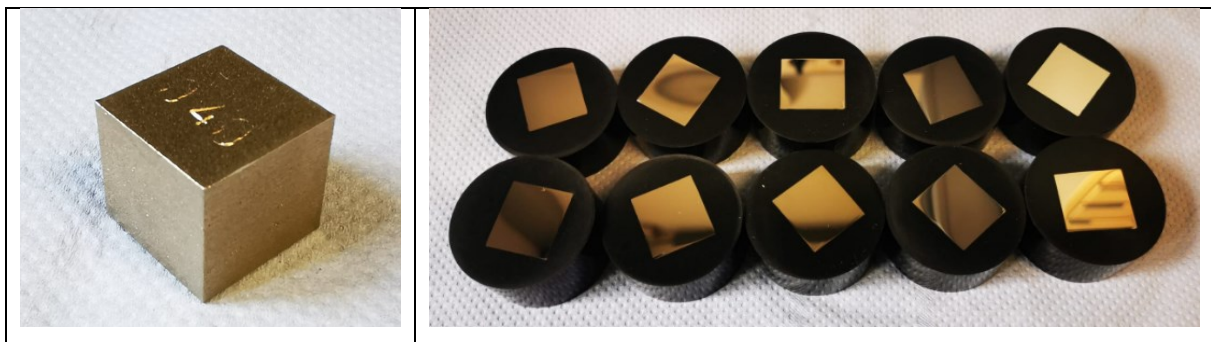


Abbildung 23: a) gebauter Würfelprobekörper; b) eingebettete Proben

Mit Hilfe des Auflichtmikroskops Olympus BX53M wurden Bilder der Proben mit verschiedenen Vergrößerungen erstellt und in weiterer Folge mittels Bildauswertungsprogramm ImageJ die Bilder in binäre Bilder, sprich schwarz-weiß Bilder umgewandelt und analysiert. Eine schematische Auswertung ist in Abbildung 24 dargestellt.

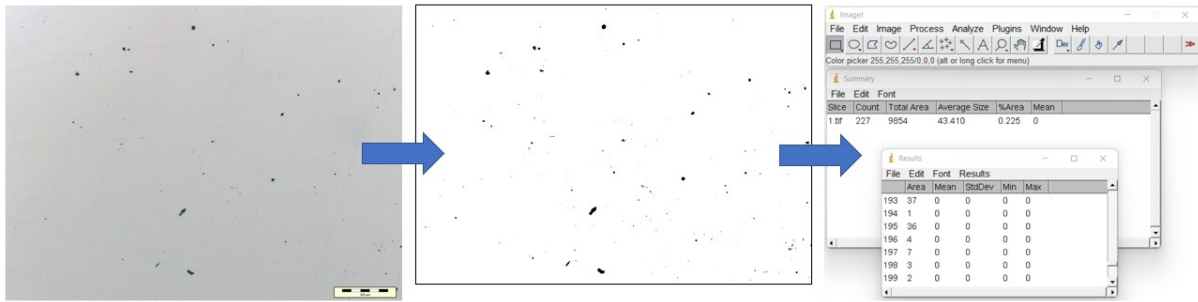


Abbildung 24: schematische Darstellung der Bildauswertung mittels ImageJ

Der Anteil der weißen Fläche wird in Prozent ausgegeben und ermöglicht dadurch eine Aussage hinsichtlich Dichte des Bauteils. Mit den Ergebnissen der ersten Versuchscharge konnten wesentliche Erkenntnisse bezüglich des Prozessfensters gewonnen werden. Um den erhaltenen Datensatz weiter zu präzisieren, wurden die Parameterkombinationen der vier Proben mit der höchsten Bauteildichte, einer weiteren Versuchsreihe zugeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 angeführt.

Tabelle 8: Parameterauswahl für die zweite Versuchsreihe

Proben- bezeichnung	Schicht- stärke [μm]	Laserleistung [W]	Laser Geschwindigkeit [mm/s]	Hatch- Abstand [mm]	Volumenenergie [J/mm ³]
2.01	80	350	850	0,11	44,75
2.02	80	350	810	0,12	45,01
2.03	80	345	775	0,125	44,52
2.04	80	350	875	0,11	45,45

Aus den Parametern der Versuchsreihe 2 wurde schlussendlich ein Parameterdatensatz ausgewählt der zu Bauteilen mit einer relativen Dichte von min. 99,8% sowie einer hohen Baurate von mind. 28 cm³/min führt. Diese Probe wurde im as-built und im wärmebehandelten Zustand (AMS5662) nach DIN SPEC 4864 hinsichtlich Streckgrenze, Zugfestigkeit, Dehngrenze und Härte untersucht. Weiters wurden die Proben im as built Zustand mittels Kailling geätzt um Schweißbahnen im Erstarrungsgefüge sichtbar zu machen.

4.3. Kostenaufstellung

Für den Standardparameterdatensatz und dem durch die Parameterstudie ausgewählten Parameterdatensatz wurde eine Kalkulation für ein Standardbauteil durchgeführt. Das Bauteil wurde einem Verbindungsteil für ein Auspuffrohr aus Inconel718, welches bei der Firma Fuchshofer in Auftrag gegeben wurde, nachempfunden. In Abbildung 25 ist das Bauteil inklusive der Maße dargestellt.



Maße:

Höhe:	H = 135 mm
Flansch rund:	D = 61,2 mm
Flansch rechteckig:	L = 108,0 mm B = 67,0 mm
Bohrungen Flansch 4x	d = 11,5 mm
Anschlüsse für Sensoren (Sackloch) 2x:	da = 7 mm di = 3,5 mm
Volumen:	V = 171,3 cm ³

Abbildung 25: Verbindungsstück für Auspuffrohr Inconel718

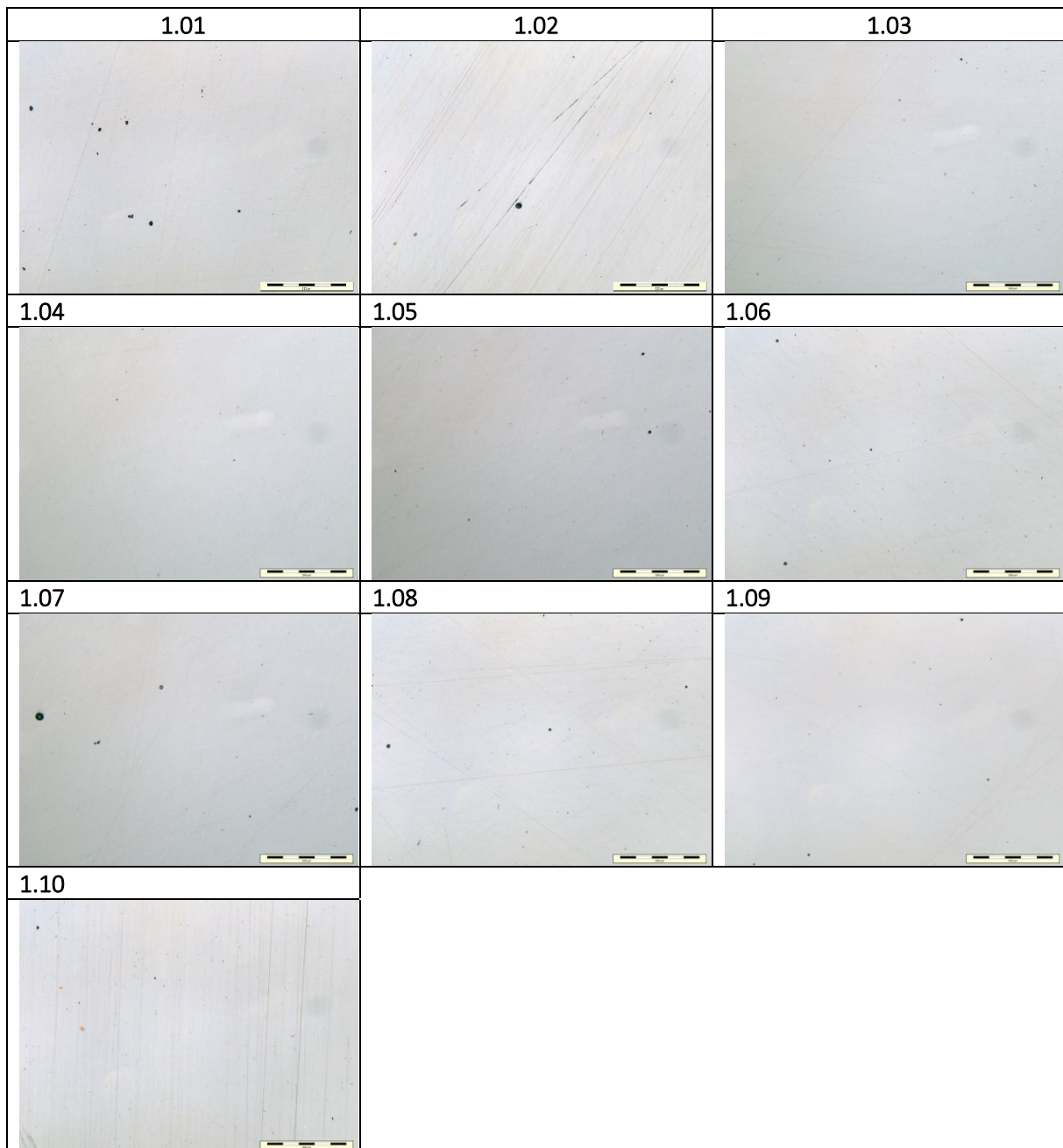
Es wurden die Produktionskosten sowie die Bauzeit für das Auspuffrohr mit den unterschiedlichen Parameterdatensätzen kalkuliert und verglichen. In weiterer Folge wurden auch die Ergebnisse der Kalkulation für ein konventionelle Fertigung mittels Fräsen betrachtet. Die Kalkulationen wurden auch für eine Anzahl von drei bzw. sechs Stück der Bauteile durchgeführt.

5. Ergebnisse und Diskussion

5.1. Ergebnisse der Parameterstudie

Bei der Auswertung der Porosität hat sich eine 100-fache Vergrößerung als ideal erwiesen. In Tabelle 9 sind Bilder der ersten Versuchsreihe mit 100-facher Vergrößerung dargestellt.

Tabelle 9: Schliffbilder der ersten Versuchsreihe



Da bei dieser Legierung auch Ausscheidungen der Phasen in den Schliffbildern zu sehen sind, wurde bei der Auswertung ein Sphäritätsgrenzwert von 0,8 – 1,0 angegeben um Poren identifizieren zu können. Poren außerhalb der Grenzwerte können unter dem Begriff „Lack of Fusion“ zusammengefasst werden.

Diese charakterisieren sich i.d.R. durch eine längliche, flache und/ oder unregelmäßige Form. Ein Vergleich zweier Schliffbilder ist in Abbildung 26 dargestellt. Mit Hilfe des Bildauswertungsprogrammes können auch weitere Poren manuell hinzugefügt werden, um sicherzustellen, dass alle schwarzen Flächen ausgewählt sind. Für eine erste Analyse ist diese Methode ausreichend, um die Poren genauer zu charakterisieren, ist eine Aufnahme mittels Rasterelektronenmikroskop notwendig.

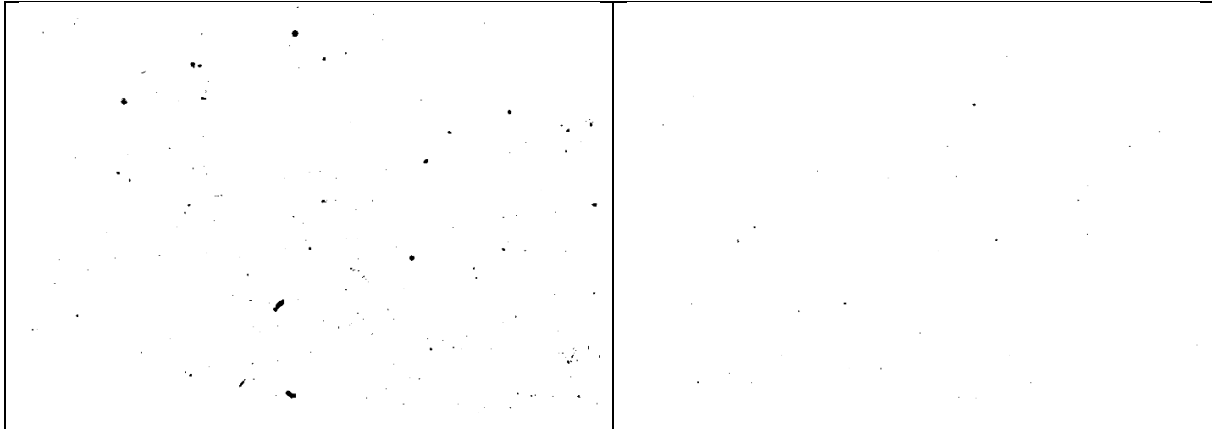


Abbildung 26: Vergleich der Porenauswertung von Probe 1.01 und 1.09

Die Bestimmung der Porosität für die Versuchsreihe 1 ergab folgende Werte, welche in Tabelle 10 aufgelistet sind.

Tabelle 10: Auswertung der ersten Versuchsreihe

Probenbezeichnung	Schichtstärke [µm]	Laserleistung [W]	Laser Geschwindigkeit [mm/s]	Hatch-Abstand [mm]	Porosität [%]	Baurate [cm³/h]
1.01	80	340	790	0,11	99,755	25,0
1.02	80	340	837,5	0,11	99,940	26,5
1.03	80	350	825	0,11	99,886	26,1
1.04	80	350	850	0,11	99,930	26,9
1.05	80	350	800	0,115	99,966	26,5
1.06	80	350	830	0,115	99,917	27,5
1.07	80	350	770	0,12	99,930	26,6
1.08	80	350	790	0,12	99,931	27,3
1.09	80	345	715	0,125	99,981	25,7
1.10	80	345	755	0,125	99,931	27,2

Die Bauteildichte für die Versuchsreihe 1 liegt durchschnittlich bei 99,91% mit einer Standardabweichung von $S_1 = 0,05$.

Die zweite Versuchsreihe führte zu folgenden Ergebnissen der Porosität:

Tabelle 11: Auswertung der zweiten Versuchsreihe

Probenbezeichnung	Schichtstärke [μm]	Laserleistung [W]	Laser Geschwindigkeit [mm/s]	Hatch-Abstand [mm]	Porosität [%]	Baurate [cm ³ /h]
2.01	80	350	850	0,11	99,963	28,2
2.02	80	350	810	0,12	99,970	28,0
2.03	80	345	775	0,125	99,564	27,9
2.04	80	350	875	0,11	99,966	27,7

Der Mittelwert der Bauteildichte für die zweite Versuchsreihe liegt bei 99,865% mit einer Standardabweichung $S_2 = 0,174$. Alle Parameterdatensätze der zweiten Versuchsreihe führten laut Norm zu dichten Bauteilen, somit wurde der Parameterdatensatz mit der höchsten Baurate, Probe 2.01 für weitere Untersuchungen ausgewählt [23].

Die Probe wurde geätzt um die Mikrostruktur darzustellen und um sicherzustellen, dass sie sich überlappen. Dies ist in Abbildung 27 zu erkennen.



Abbildung 27: Schliffbild Probe 2.01 - geätzt mit Kailling

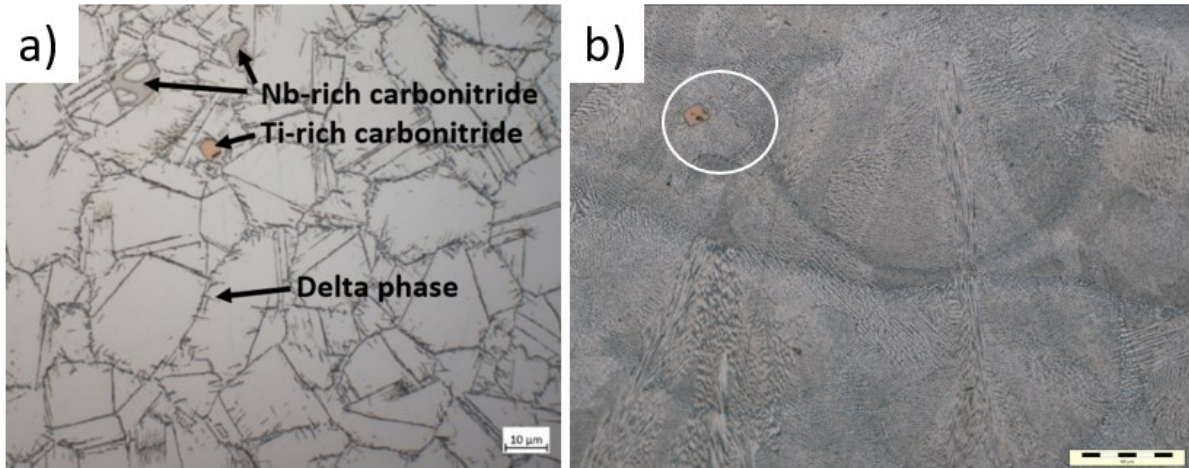
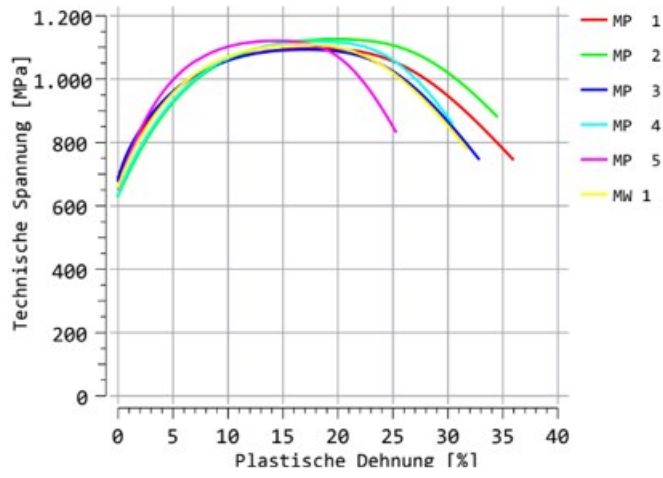


Abbildung 28: a) Schlibfbild aus Literatur [54] b) Schlibfbild Probe 2.01 - geätzt mit Kailling

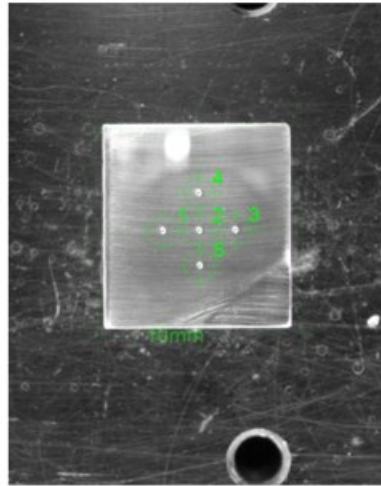
In Abbildung 28 ist im linken, oberen Bereich eine Ausscheidung zu erkennen. Diese in den Bildern orange gefärbten Bereiche sind titanreiche Karbonitride (TiC oder TiN). Diese Die Analyse der Schlibfbilder zeigt deutliche Grenzen der Schmelzbäder und Kornwachstum über die Schmelzbadgrenzen.

Die mechanischen Kennwerte für die ausgewählte Probe und für die Referenzprobe wurden jeweils im as-built und im wärmebehandelten Zustand (AMS5662) nach der DIN SPEC 4864 ausgewertet. Auf der rechten Seite in Abbildung 29 sind die Härteeindrücke 1- 5 auf den Proben dargestellt. Links im Bild sind die zugehörigen Spannungs-Dehnungs-Diagramme mit den zugehörigen Kurven zu sehen. In Abbildung 30 ist die Auswertung der wärmebehandelten Proben zu sehen.

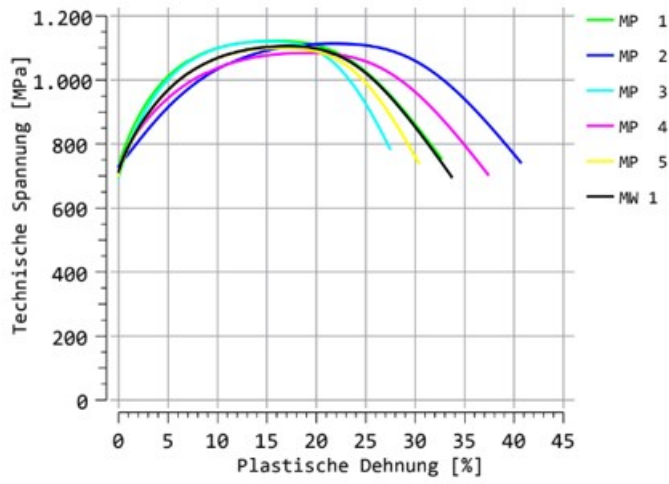
Probe 2.01



Messpunktübersicht:



Probe Referenz



Messpunktübersicht:

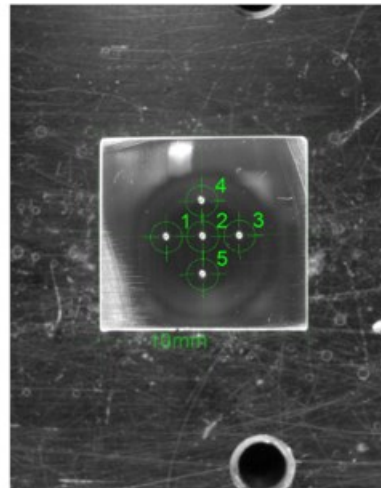
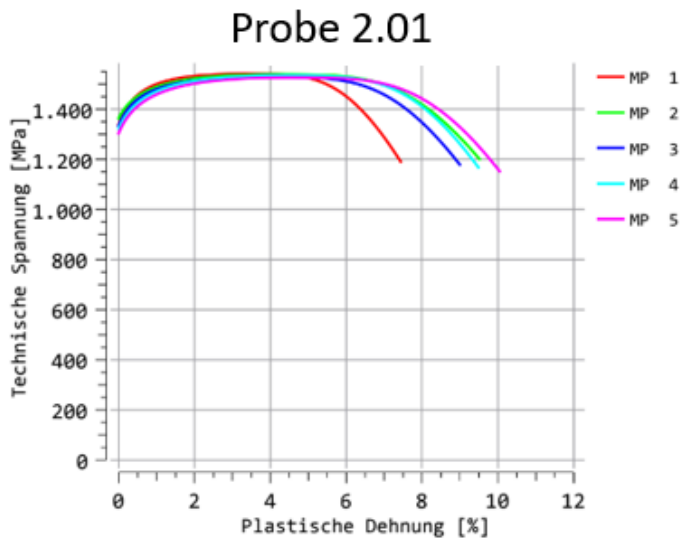
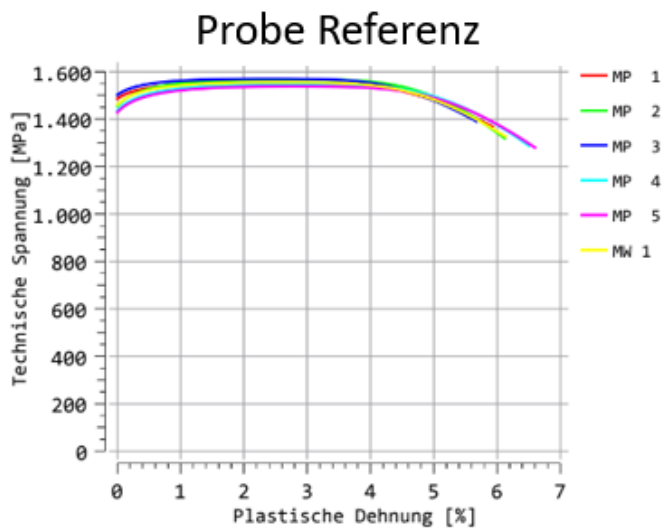
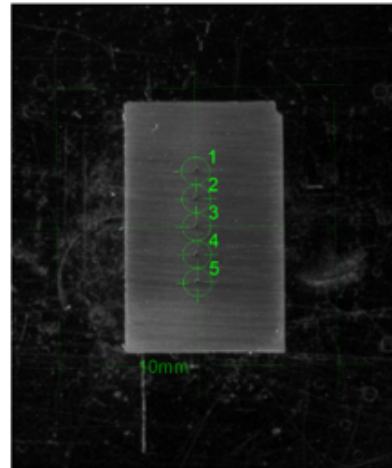


Abbildung 29: Auswertung von Probe 2.01 und der Referenzprobe im as-built Zustand



Messpunktübersicht:



Messpunktübersicht:

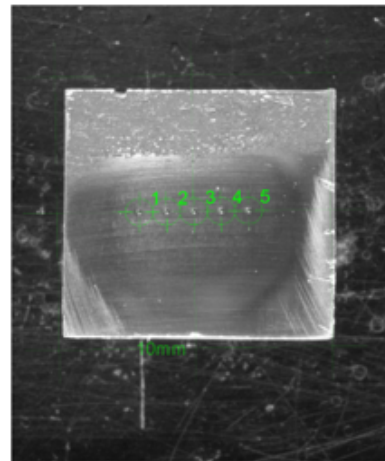


Abbildung 30: Auswertung der Probe 2.01 und der Referenzprobe im wärmebehandelten Zustand

Nachfolgend werden die Streckgrenze, die Zugfestigkeit und die Dehnung für die Referenzprobe und die ausgewählte Probe 2.01, im as built und im wärmebehandelten Zustand direkt miteinander verglichen. Um dies zu veranschaulichen wurde für jeden dieser mechanischen Kennwerte ein Diagramm erstellt.

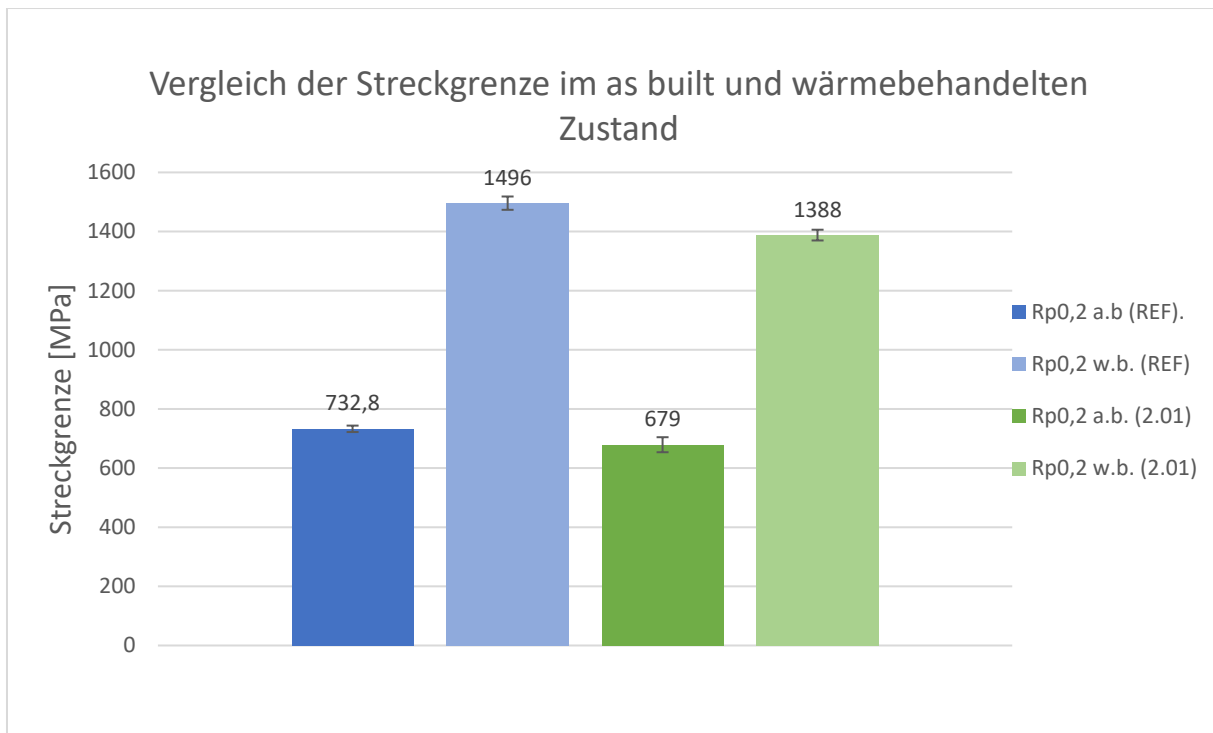


Abbildung 31: Vergleich der Streckgrenze

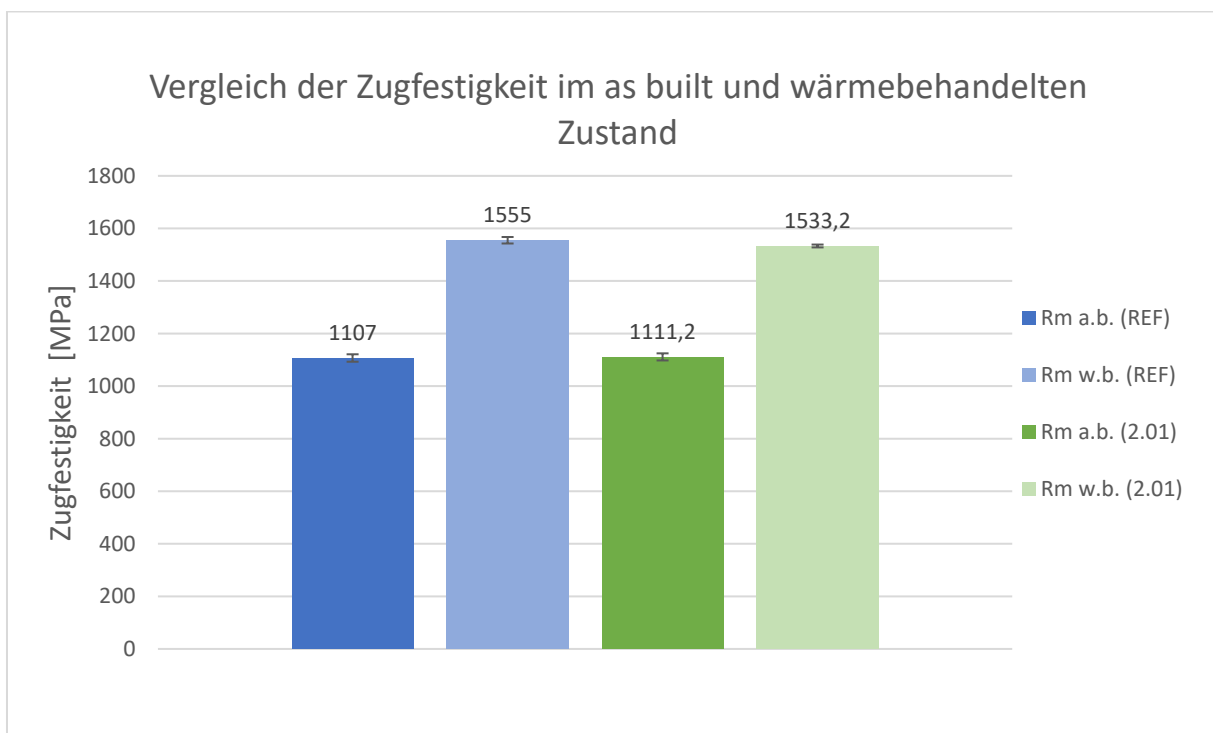


Abbildung 32: Vergleich der Zugfestigkeit

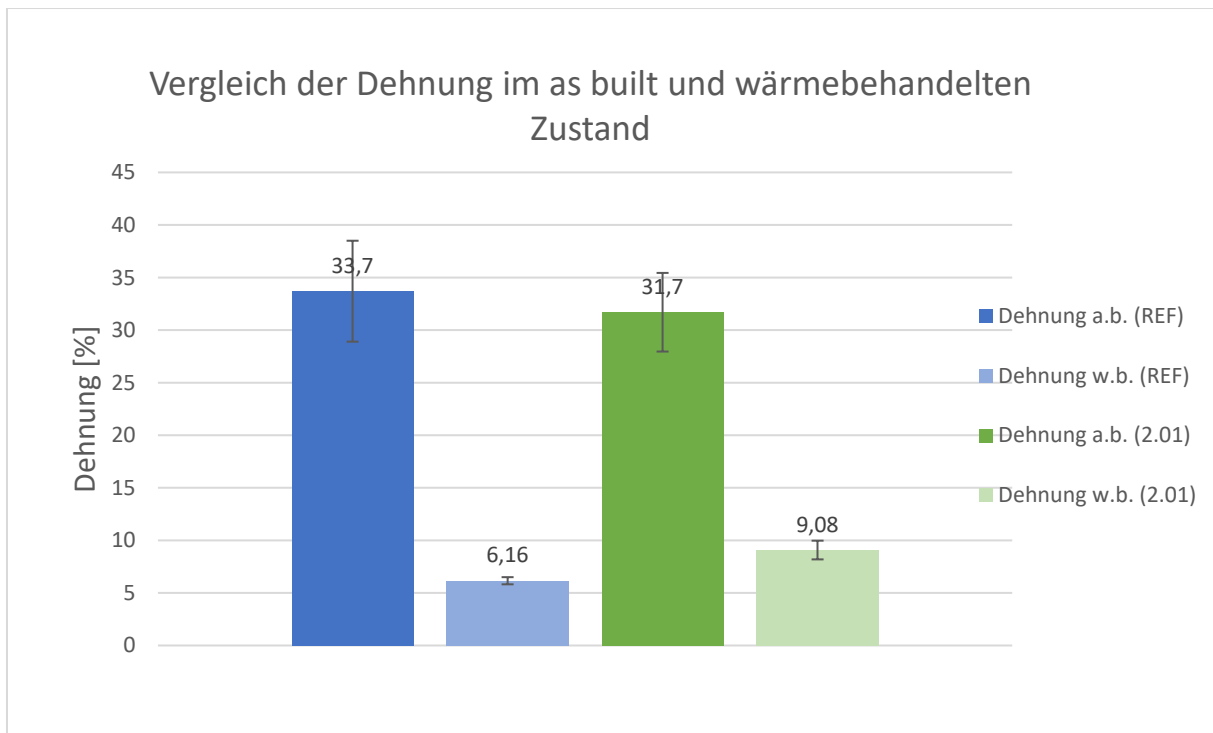


Abbildung 33: Vergleich der Dehnung

Es sind deutliche Unterschiede zwischen den as built Werten und den wärmebehandelten Werten zu erkennen. Dies bestätigt damit den Einfluss der Wärmebehandlung auf die Festigkeit. Durch die Ausbildung von feinerem Gefüge wird die Festigkeit gesteigert. Die Werte der Probe mit einer Schichtstärke von 80µm liegt bei allen Kennwerten ein wenig unter der Referenzprobe, welche mit einer Schichtstärke von 40µm gedruckt wurde. Jedoch liegen die Werte für die Streckgrenze und der Zugfestigkeit deutlich über den Erfahrungswerten aus der Literatur. Lediglich die Dehnungen im wärmebehandelten Zustand liegen deutlich unterhalb der Erfahrungswerte.

5.2. Wirtschaftliche Betrachtung

Konventionelle Fertigung des Bauteils - Drehen und Fräsen

Wie bereits in der Methodenplanung erwähnt, wurden die Daten für eine Kalkulation von der Firma Fuchshofer zur Verfügung gestellt. Es wurden hier Standardwerte für die Bearbeitung eines Bauteils herangezogen. Ein ähnliches Teil wurde bereits so gefertigt, darum liegen in diesem Fall reale Referenzen vor. Die hier durchgeführte Kalkulation ist eine Zuschlagskalkulation ohne Gewinnzuschlag und berücksichtigt alle Gemeinkosten.

Die Berechnung der Herstellkosten unterteilt sich in verschiedene Posten. Zur Vorbereitung von diesem Bauteil werden ca. 12 Stunden an Konstruktions- und Programmierzeit eingeplant und weitere drei

Stunden zur Konstruktion einer Spannvorrichtung für die Bearbeitung. Die Bearbeitung dieses Bauteils läuft folgendermaßen ab:

- Spannfläche fräsen um Bauteil zu fixieren
- Innen Hohlraum fräsen
- Außen Material abtragen
- Innen Zeilen
- Außen Vorderseite
- Außen Hinterseite
- Gewinde und genaue Flächen

Die Produktionszeit für Fräsen/Drehen wird mit ca. 20 Stunden angegeben und die Produktionszeit für allgemeine Tätigkeiten wie Manipulation, und Rüstzeit wird mit 15 Stunden kalkuliert. Ein weiterer Kostenpunkt ist die Beschaffung des Rohteils. Durch die subtraktive Bearbeitung wird von einem Zylinder ausgegangen, wie in Abbildung 34 dargestellt.

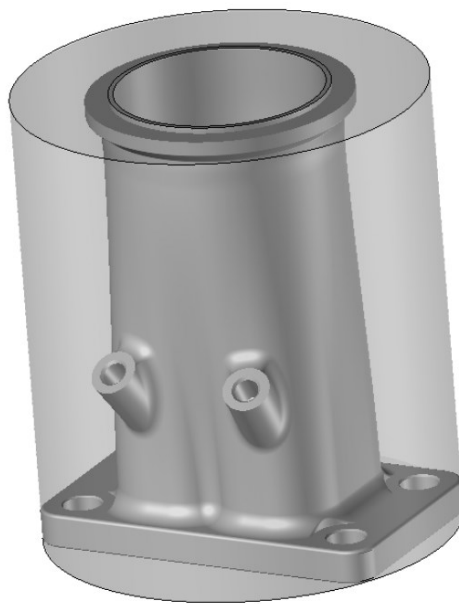


Abbildung 34: Rohteil für subtraktive Bearbeitung

Die Maße für das Rohteil inklusive Zugabe betragen 125x140 mm. Daraus ergibt sich ein Volumen von 1718,1 cm³. Die Berechnung der Masse des Rohteils erfolgt über die Dichte von Inconel718 mit 8,15 g/cm³ ergibt einen Wert von ca. 14kg. Mit dem Kilopreis von 75 € ergibt sich ein Gesamtpreis von ca. 1050 € nur für das Rohmaterial. Einen weiteren hohen Kostenfaktor stellen in diesem Fall die Werkzeugkosten dar. Diese werden mit 2000 € angenommen, aufgrund von hohem Werkzeugverschleiß. Bei der Verarbeitung mittels CNC- Maschinen werden sogenannte Einsteller mitproduziert. Mittels dieser Einsteller wird die Ablaufqualität des CNC- Programms für Bauteile mit

präzisen Form- und Lagetoleranzen getestet und bei Bedarf entsprechend adaptiert. Dazu wird dieses Bauteil bei jedem Fertigungsschritt als erstes bearbeitet. Dabei wird der Einsteller hinsichtlich der jeweiligen Losgröße kalkulatorisch berücksichtigt. Die Stückzahlen sowie die damit einhergehende Kosten dieser Bauteile, können entsprechend der verwendeten Norm, beziehungsweise den Qualitätsvorgaben des Kunden variieren. Darum wurde die Berechnung der Produktionskosten für jeweils 1, 3 und 6 Stück durchgeführt um dies zu veranschaulichen. Die Gesamtkosten pro Stück werden in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 12: Produktionskosten für 1,3 und 6 Stück mit konventioneller Fertigung

	1 Stück	3 Stück	6 Stück
Drehen/Fräsen	3090	2060	1800
Materialkosten	1050	1050	1050
Einsteller	2630	875	437
Konstruktion/Programmierung	1000	364	202
Werkzeugkosten	2000	1000	800
Sonstiges (Fracht, Manipulation, Zuschnitt)	280	153	122
Kosten pro Stück [€]	10050	5500	4400

Additive Fertigung des Bauteils - LPBF-Prozess

Die Herstellungsschritte des in Kapitel 4.3. genannten Bauteils werden dadurch bestimmt, welche Anforderung an das Bauteil gestellt werden. Passungen, Gewinde und Maße mit feinen Toleranzen führen nicht daran vorbei auch additiv gefertigte Bauteile durch Fräsen oder Drehen nachbearbeiten zu müssen. In Abbildung 35 sind all diese Flächen blau eingefärbt.

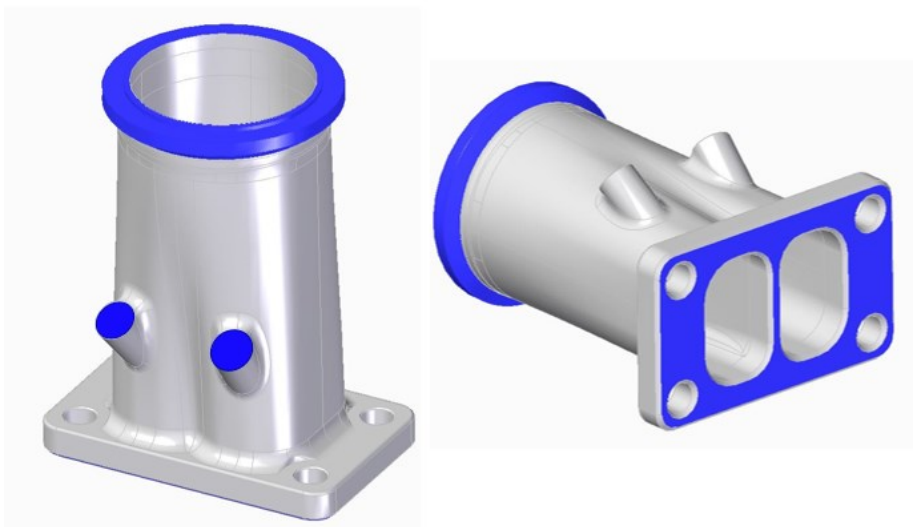


Abbildung 35: Auspußrohr - Blaue Flächen müssen mechanisch nachbearbeitet werden

Jedoch können durch die additive Fertigung endkonturnahe Bauteile hergestellt werden und dadurch Rohstoffkosten eingespart werden. Am runden Flansch wird ein Aufmaß von 0,5mm hinzugefügt, um sicherzustellen, dass für die mechanische Nacharbeit genug Material vorhanden ist. Am eckigen Flansch wird mehr Aufmaß hinzugegeben, da das Bauteil in diesem Bereich an die Substratplatte angebunden ist und mittels Drahterosion von der Platte getrennt wird. Abbildung 36 zeigt die Orientierung des Bauteils auf der Platte.

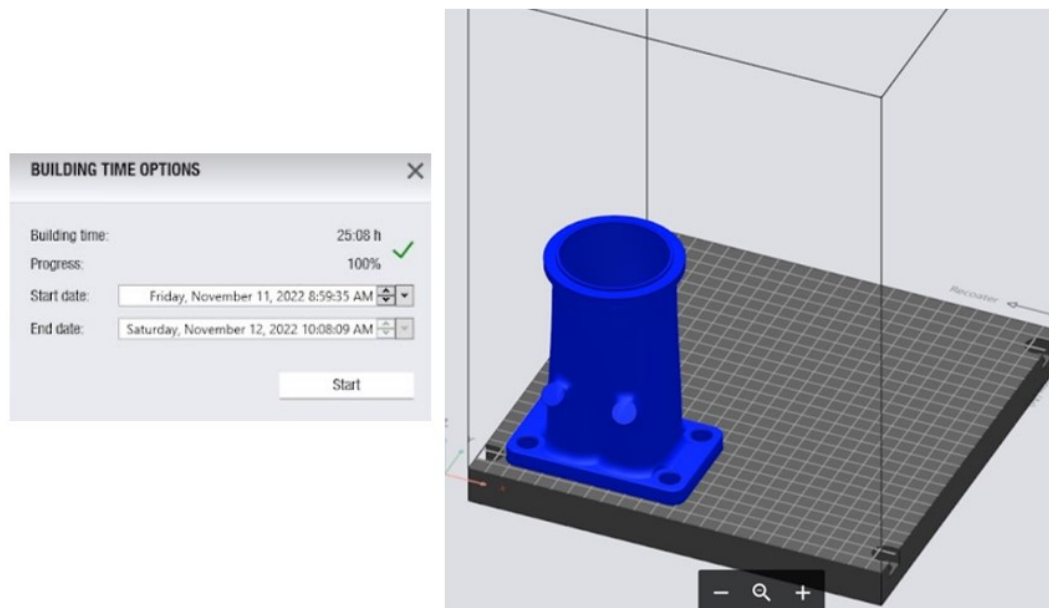


Abbildung 36: Bauzeit für ein Bauteil mit 40µm Schichtstärke

Die reine Bauzeit für dieses eine Bauteil liegt bei ca. 25 Stunden. Für die Kalkulation für den LPBF-Prozess wird im ersten Schritt über das CAD-File das Volumen des Bauteils und der benötigten Supportstrukturen berechnet. Dadurch ergibt sich die benötigte Menge an Pulver und der Materialwert. In diesem Fall wird kein Support benötigt, da keine Überhänge zu stützen sind. Dadurch beläuft sich der reine Materialwert auf ca. 160 €. Die Druckkosten, bei denen auch der Argonverbrauch inkludiert ist, betragen 1430€. Durch die notwendige Wärmebehandlung werden weitere 300€ berechnet. Die Nacharbeit wie Drahterodieren, Finishing und auch das Rüsten und Auspacken der Maschine wird in Summe mit 240€ berechnet. Die mechanische Nacharbeit an den Flanschen und für die Bohrungen kosten 1460 €. Auch für die additive Fertigungsvariante wurde die Kalkulation für 1,3 und 6 Stück durchgeführt. In den vorigen Kapiteln konnte gezeigt werden, dass der LPBF-Prozess für Inconel718 auch mit einer Schichtstärke von 80µm zu dichten Bauteilen führt. Dies ermöglicht es die Produktionszeit zu reduzieren und dadurch Kosten einzusparen. Die folgende Abbildung 37 zeigt die berechneten Werte und den direkten Vergleich der Zeiteinsparung, wenn mit doppelter Schichtstärke gedruckt wird.

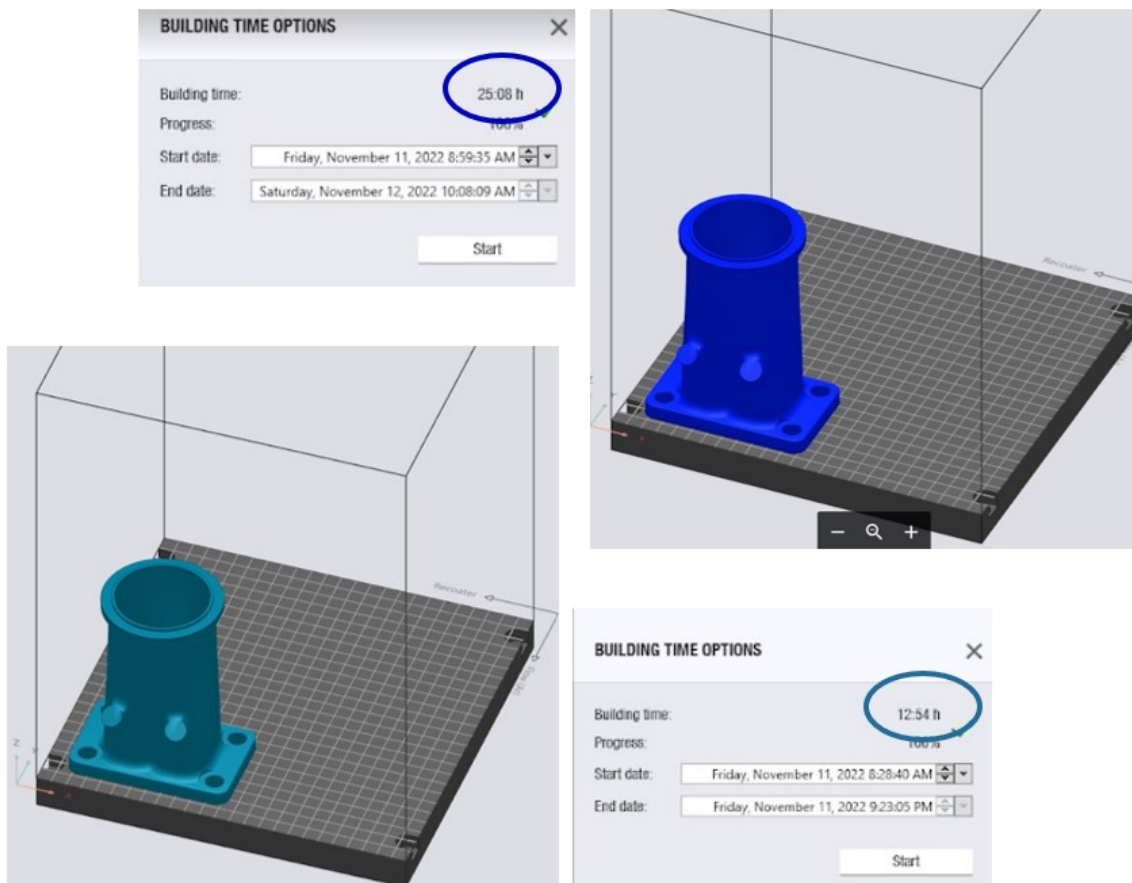


Abbildung 37: Vergleich der Bauzeit 40µm und 80µm Schichtstärke

Die Bauzeit kann dadurch beinahe halbiert werden. Auch für diesen Fall wurden die Produktionskosten für jeweils 1, 3 und 6 Stück berechnet. Um den Vergleich zu verdeutlichen sind die Werte in der folgenden Tabelle zusammengefasst

Tabelle 13: Zusammenfassung der Stückkosten für die Additive Fertigung

	1 Stück	1 Stück	3 Stück	3 Stück	6 Stück	6 Stück
Schichtstärke	40µm	80µm	40µm	80µm	40µm	80µm
Materialkosten	160	160	160	160	160	160
Druckkosten	1430	740	990	515	880	460
Vorbereitung	125	125	40	40	20	20
Wärmebehandlung	300	300	100	100	50	50
Nacharbeit AM	115	115	90	90	70	70
Nachbearbeitung Fräsen	1460	1460	620	620	620	620
Kosten pro Stück [€]	3590	2900	2000	1525	1800	1380

Die Produktionskosten für eine konventionelle Herstellung unterscheiden sich in diesem Fall deutlich zu denen der additiven Fertigung. Dies wird in Abbildung 38 veranschaulicht.

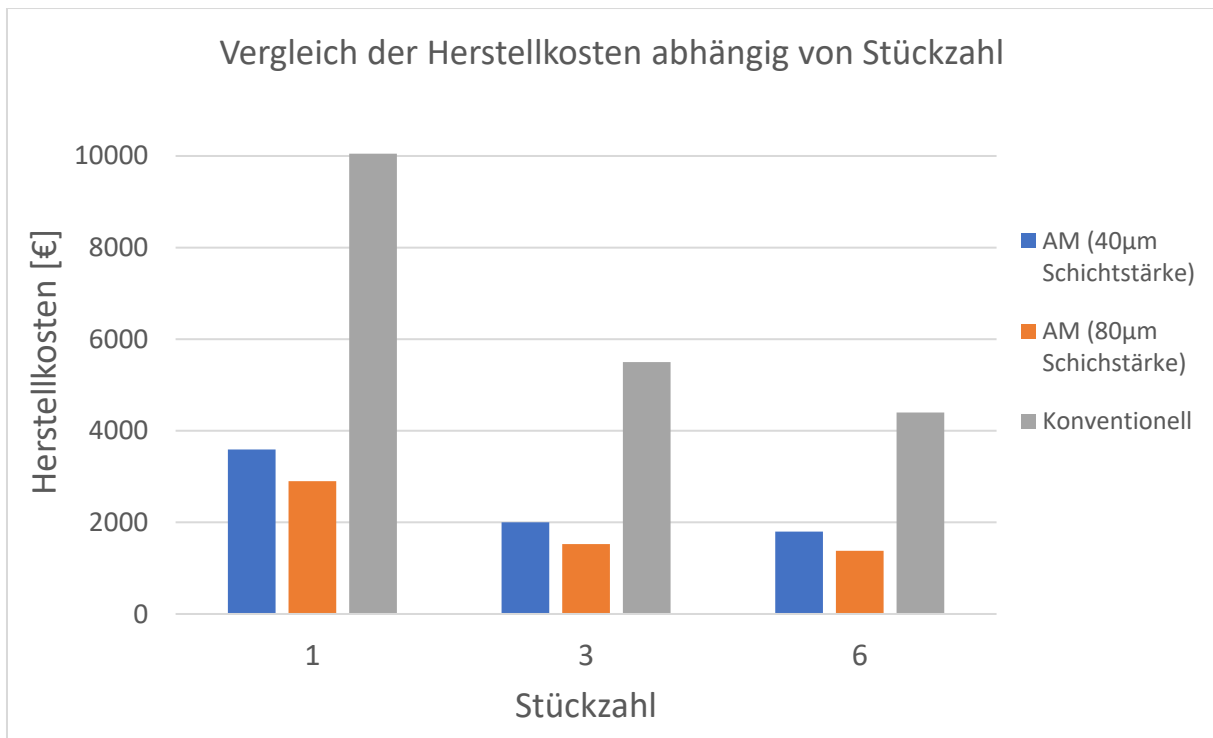


Abbildung 38: Vergleich der Herstellkosten anhängig von Stückzahl und Fertigungsverfahren

Was in beiden Fällen klar zu erkennen ist, sind die Kostensenkungen bei steigender Anzahl an Bauteilen. Dies kann jedoch nicht pauschalisiert werden. Der Fräsprozess wird mit jedem Bauteil günstiger, was bei den AM Bauteilen bis zu einer Anzahl von 6 Stück beobachtet werden kann, da die maximale Anzahl an Bauteilen für einen Baujob mit 6 Stück erreicht ist. Dies ist einer der Nachteile des LPBF-Prozesses.

Einer der größten Kostenfaktoren beim gefrästen Teil sind die Werkzeugkosten. Das Volumen des Vollkörpers aus dem das Bauteil hergestellt wird, beträgt ca. 1720cm^3 . Das fertige Bauteil weist ein Volumen von 170cm^3 auf. Das heißt ca. 90% des Rohteils werden entfernt, wodurch die Werkzeuge über einen längeren Zeitraum hoch beansprucht werden. Durch die Kontamination mit Schmiermittel und etwaigen anderen Verunreinigungen werden diese 90% zu Abfall. Auch das additiv gefertigte Bauteil muss mechanisch nachbearbeitet werden, dies hält sich jedoch im Vergleich zum gefrästen Bauteil in Grenzen.

Werden die zwei Fälle für die additive Fertigung betrachtet, ist zu erkennen, dass sich die Reduktion der Bauzeit nur in den Druckkosten widerspiegelt. Die restlichen Kosten bleiben konstant. Die Erhöhung der Schichtstärke ist jedoch nicht immer ein Vorteil. Durch die Verdopplung dieser wird die Oberfläche deutlich grober, was für einige Anwendungen problematisch ist. Zusätzlich zeigt dieser Vergleich, dass nicht nur die Kostenreduktion im Vordergrund stehen kann. Vielmehr ist es der Gewinn an Designfreiheit, welcher konventionell undenkbare Geometrien ermöglicht oder unter Einbeziehung der gesamten Baugruppe ein komplettes Redesign derselben erfordert bzw. möglich macht. Daher ist ein

1:1 Vergleich von Bauteilen die bereits konventionell hergestellt werden direkt nie zielführend. Vielmehr müssen Nebeneffekte wie Montageaufwand, Bauteilperformance, Optimierungspotentiale oder Lebensdauer genaugenommen mit in den Vergleich inkludiert werden. Zusätzlich ist für die additive Fertigung auch die Werkstoffwahl noch ein Thema

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die Prozessparameterstudie hat deutlich gezeigt, dass Inconel178 durch Verdopplung der Schichtstärke mit erhöhter Baurate gebaut werden kann. Gerade in Zeiten wie diesen, in der klimapolitische Auflagen zu erfüllen sind und Emissionen reduziert werden sollten, ist eine Ausnutzung an Möglichkeiten für Einsparungen unabdingbar. Für Bauteile, welche schwer bearbeitet werden können und zu hohem Werkzeugverschleiß führen, stellt die additive Fertigung eine Alternative dar. Werden für ein und dasselbe Bauteil aus Inconel718 zwei Herstellverfahren wie sie unterschiedlicher nicht sein könnten betrachtet, können große Unterschiede in den Produktionskosten und Produktionszeiten wahrgenommen werden. Durch die thermischen und mechanischen Schwierigkeiten bei der Bearbeitung durch Fräsen, ist die additive Fertigung in diesem Fall deutlich zu bevorzugen.

Doch die additive Fertigung weist noch viele weitere Vorteile auf, wie die nahezu endlose Gestaltungsfreiheit, welche sich häufig in topologieoptimierten Bauteilen finden lässt. Durch die steigende Nachfrage der additiven Fertigung sinkt der Preis für die Einstiegskosten, da die Technologie bisher eine hohe Anfangsinvestition erforderte. Es reduziert sich nicht nur der Materialausschuss, sondern auch die Kosten für hohe Lagerbestände sinken, da diese kaum noch benötigt werden. Gerade im Bereich der Bauteiloptimierung wird die additive Fertigung künftig eine wesentliche Rolle spielen, da kleine Änderungen oder Verbesserungen einfach vorzunehmen sind. Da die Nachfrage an additiv gefertigten Bauteilen in den nächsten Jahren zunehmen wird, steigt auch der Bedarf an ausgebildeten Mitarbeitern. Besonders im Bereich von Design und Konstruktion muss sich das additive Denken durchsetzen [5]. Derzeit sind die Ausbildungsmöglichkeiten stark begrenzt und dies wird sich in den nächsten Jahren auch nur langsam ändern.

Jedoch wird die Technologie keines der bisher bestehenden konventionellen Produktionsverfahren ablösen können. Es ist vielmehr eine Erweiterung der bisherigen Möglichkeiten um eine Technologie, die dem Designer nahezu keine Grenzen setzt.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zusammenhang Kosten und Komplexität abhängig von Fertigungsverfahren [4]	2
Abbildung 2: Globales Marktvolumen von 3D-Druck-Verfahren in ausgewählten Branchen im Jahr 2015 und eine Prognose für 2030 [9]	3
Abbildung 3: Einheitszellen von γ - Matrix und γ'' - Ausscheidungen Ni ₃ Nb [17]	6
Abbildung 4 : Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Diagramm nach Oradei-Basile und Radavich [24]	8
Abbildung 5: Kugel mit unterschiedlich vielen Polygonen [28]	10
Abbildung 6: Funktion von Build Prozessor [29]	11
Abbildung 7: Allgemeine Darstellung des Laser-Pulverbett-Fusionsprozesses, die verschiedene Regionen und Phänomene zeigt, die wahrscheinlich in verschiedenen Arbeitsmodi des LPBF-Prozesses vorhanden sind [21].	12
Abbildung 8: Schematische Darstellung von LPBF Prozess [33]	13
Abbildung 9: SLM Prozess Parameter: Schichtstärke, Hatch- Abstand, Scangeschwindigkeit, Laserpower [35]	14
Abbildung 10: Vergleich a) Streifenbelichtung und b) Schachbrettbelichtung [37]	15
Abbildung 11: Zusammenhang von Laserleistung und Scangeschwindigkeit und deren Auswirkung auf das Bauteil [39]	16
Abbildung 12: Auswirkungen der Prozessparameter außerhalb des Betriebsfensters [39]	17
Abbildung 13: Oberflächenrauheit verschiedener 3D- Druckverfahren [41]	17
Abbildung 14: Parameterstudie für Kunststoffformenstahl [42]	18
Abbildung 15: Schweißbahnen einer Prozessparameterstudie - Beispiel [43]	18
Abbildung 16: Beispielbild Porenauswertung [44]	19
Abbildung 17: schematische Darstellung von Down-skin und Up-skin [45]	20
Abbildung 18: a) Camsizer zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung; b) Hall- flowmeter	23
Abbildung 19: Probewürfel mit 20 mm Kantenlänge	24
Abbildung 20: Verlauf der Wärmebehandlung nach AMS 5662	25
Abbildung 21: Partikelgrößenverteilung des verwendeten Pulvers	27
Abbildung 22: Morphologie des verwendeten In718- Pulvers - a) 1000x, b) 3000x vergrößert	28
Abbildung 23: a) gebauter Würfelprobekörper; b) eingebettete Proben	29
Abbildung 24: schematische Darstellung der Bildauswertung mittels ImageJ	30
Abbildung 25: Verbindungsstück für Auspuffrohr Inconel718	31
Abbildung 26: Vergleich der Porenauswertung von Probe 1.01 und 1.09	33
Abbildung 27: Schliffbild Probe 2.01 - geätzt mit Kailling	34
Abbildung 28: a) Schliffbild aus Literatur [54] b) Schliffbild Probe 2.01 - geätzt mit Kailling	35
Abbildung 29: Auswertung von Probe 2.01 und der Referenzprobe im as- built Zustand	36

Abbildung 30: Auswertung der Probe 2.01 und der Referenzprobe im wärmebehandelten Zustand...	37
Abbildung 31: Vergleich der Streckgrenze	38
Abbildung 32: Vergleich der Zugfestigkeit	38
Abbildung 33: Vergleich der Dehnung	39
Abbildung 34: Rohteil für subtraktive Bearbeitung	40
Abbildung 35: Auspuffrohr - Blaue Flächen müssen mechanisch nachbearbeitet werden.....	41
Abbildung 36: Bauzeit für ein Bauteil mit 40µm Schichtstärke	42
Abbildung 37: Vergleich der Bauzeit 40µm und 80µm Schichtstärke	43
Abbildung 38: Vergleich der Herstellkosten anhängig von Stückzahl und Fertigungsverfahren	44

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: chemische Zusammensetzung von IN718 [14]	5
Tabelle 2: Zusammenfassung der Phasen von Inconel718 in additiv gefertigten Bauteilen [16]	5
Tabelle 3: Mechanische Kennwerte für Inconel718 Bauteile [29; 46]	20
Tabelle 4: Ätzmittel für Inconel718 [50]	21
Tabelle 5: verwendete Geräte für metallographischen Schliff	24
Tabelle 6: chemische Zusammensetzung des verwendeten Werkstoffes	27
Tabelle 7: Parameterauswahl für erste Versuchsreihe	28
Tabelle 8: Parameterauswahl für die zweite Versuchsreihe	30
Tabelle 9: Schliffbilder der ersten Versuchsreihe	32
Tabelle 10: Auswertung der ersten Versuchsreihe	33
Tabelle 11: Auswertung der zweiten Versuchsreihe	34
Tabelle 12: Produktionskosten für 1,3 und 6 Stück mit konventioneller Fertigung	41
Tabelle 13: Zusammenfassung der Stückkosten für die Additive Fertigung	43

Literaturverzeichnis

- [1] Schwehm, S.; Konventionelle vs. additive Fertigung; Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH; Wiesbaden. 10.1007/978-3-658-33923-4_5
- [2] Klahn, C.; Meboldt, M.; Entwicklung und Konstruktion für die Additive Fertigung; Vogel Business Media; Würzburg; 2018. 978-3-8343-3395-7
- [3] additive - Das Magazin für generative Fertigung; Industrie 4.0: Der Vormarsch der additiven Fertigung;
- [4] Fachhochschule Nordwestschweiz; 3D-Druck von Metall- und Kunststoffteilen inklusive fertigungsgerechter Konstruktion.;
- [5] Wirtschaftsagentur Wien; Additive Fertigung - Technologie Report; Wirtschaftsagentur Wien; 2020
- [6] Lachmayer, R.; Lippert, R. B.; Additive Manufacturing Quantifiziert; Springer Berlin Heidelberg; Berlin, Heidelberg; 2017. 10.1007/978-3-662-54113-5
- [7] AMPower Report; additive manufacturing metal technology; <https://additive-manufacturing-report.com/additive-manufacturing-metal-technology/#002>
- [8] EOS; Vorteile des 3D- Drucks für Luft- und Raumfahrt; <https://www.eos.info/de/beispiele-additive-fertigung/luft-und-raumfahrt>
- [9] statista; Globales Marktvolumen von 3D-Druck-Verfahren in ausgewählten Branchen im Jahr 2015 und eine Prognose für 2030; <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/802439/umfrage/globales-marktvolumen-von-3d-druck-verfahren-in-ausgewaehlten-branchen/>
- [10] Marschall, H.; Personal für die additive Fertigung; Springer Vieweg; Wiesbaden; 2016. 10.1007/978-3-658-13307-8. 978-3-658-13307-8
- [11] Smiths High Performance; Inconel 718 - Eine hochfeste Superlegierung mit ausgezeichneter Schweißbarkeit; <https://www.smithshp.com/de/inconel-718.htm#:~:text=Das%20Material%20wird%20f%C3%BCr%20D%C3%BCsentriebwerke,und%20Gassektor%20f%C3%BCr%20Bohrlochkomponenten%20verwendet>
- [12] Jia, Q.; Gu, D.; Selective laser melting additive manufacturing of Inconel 718 superalloy parts: Densification, microstructure and properties. 10.1016/j.jallcom.2013.09.171
- [13] Musekamp, J.; Hoche, H.; Specific Characteristics of Materials Produced by Additive Manufacturing as Compared to Those Produced by Established Manufacturing Methods taking the Example of Alloy 718. 10.3139/147.110604
- [14] Metalpine GmbH; Datenblatt Inconel 718;
- [15] Tucho, W. M.; Cuvillier, P.; Sjolyst-Kverneland, A.; Hansen, V.; Microstructure and hardness studies of Inconel 718 manufactured by selective laser melting before and after solution heat treatment. 10.1016/j.msea.2017.02.062

- [16] Schneider, J.; Farris, L.; Nolze, G.; Reinsch, S.; Cios, G.; Tokarski, T.; Thompson, S.; Microstructure Evolution in Inconel 718 Produced by Powder Bed Fusion Additive Manufacturing. 10.3390/jmmp6010020
- [17] Renhof Lars; Mikrostruktur und mechanische Eigenschaften der Nickellegierung IN718; Dissertation; Technische Universität; München; 2007
- [18] Gong, H.; Rafi, K.; Gu, H.; Starr, T.; Stucker, B.; Analysis of defect generation in Ti–6Al–4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes. 10.1016/j.addma.2014.08.002
- [19] Ni, M.; Chen, C.; Wang, X.; Wang, P.; Li, R.; Zhang, X.; Zhou, K.; Anisotropic tensile behavior of in situ precipitation strengthened Inconel 718 fabricated by additive manufacturing. 10.1016/j.msea.2017.06.098
- [20] Chlebus, E.; Gruber, K.; Kuźnicka, B.; Kurzac, J.; Kurzynowski, T.; Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of Inconel 718 processed by selective laser melting. 10.1016/j.msea.2015.05.035
- [21] Yong, C. K.; Gibbons, G. J.; Wong, C. C.; West, G.; A Critical Review of the Material Characteristics of Additive Manufactured IN718 for High-Temperature Application. 10.3390/met10121576
- [22] Brenne, F.; Taube, A.; Pröbstle, M.; Neumeier, S.; Schwarze, D.; Schaper, M.; Niendorf, T.; Microstructural design of Ni-base alloys for high-temperature applications: impact of heat treatment on microstructure and mechanical properties after selective laser melting. 10.1007/s40964-016-0013-8
- [23] Additive manufacturing processes, rapid manufacturing - Beam melting of metallic parts - Qualification, quality assurance and post processing; VDI - Verein deutscher Ingenieure; Düsseldorf; 08-2013
- [24] A. Oradei-Basile , J. Radavich; A Current T-T-T Diagram for Wrought Alloy 718; School of Materials Engineering; Purdue;
- [25] Liang, X.; Liu, Z.; Wang, B.; State-of-the-art of surface integrity induced by tool wear effects in machining process of titanium and nickel alloys: A review. 10.1016/j.measurement.2018.09.045
- [26] Agmell, M.; Bushlya, V.; M'Saoubi, R.; Gutnichenko, O.; Zaporozhets, O.; Laakso, S. V. A.; Ståhl, J.-E.; Investigation of mechanical and thermal loads in pcBN tooling during machining of Inconel 718. 10.1007/s00170-020-05081-8
- [27] Bartolomeis, A. de; Newman, S. T.; Jawahir, I. S.; Biermann, D.; Shokrani, A.; Future research directions in the machining of Inconel 718; 2021. 10.1016/j.jmatprotec.2021.117260
- [28] André Schledermann; SLT - Dateiformat; <https://tams.informatik.uni-hamburg.de/lehre/2015ss/seminar/3dp/presentations/stl-dateiformat-schledermann.pdf>

- [29] Build Processor; <https://3druck.com/nachrichten/materialise-build-processor-fuer-leapfrog-und-miicraft-3d-drucker-erhaeltlich-1028776/>
- [30] Supportstrukturen; <https://3faktor.com/supportstrukturen-im-3d-druck/>
- [31] EOS; Einsatzfälle verschiedener Recoater- Konfigurationen für das DMLS; <https://www.eos.info/de/blog-artikel/recoater-konfigurationen-fuer-dmls>
- [32] Einfluss von Spurengasen und Lagerbedingungen auf das pulverbettbasierte Laser-Strahlschmelzen; Dissertation; Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik; Duisburg- Essen; 2020
- [33] Chen, Q.; Guillemot, G.; Gandin, C.-A.; Bellet, M.; Finite element modeling of deposition of ceramic material during SLM additive manufacturing. 10.1051/mateconf/20168008001
- [34] Onuiké, B.; Bandyopadhyay, A.; Additive manufacturing in repair: Influence of processing parameters on properties of Inconel 718; 2019. 10.1016/j.matlet.2019.05.114
- [35] Yap, C. Y.; Chua, C. K.; Dong, Z. L.; Liu, Z. H.; Zhang, D. Q.; Loh, L. E.; Sing, S. L.; Review of selective laser melting: Materials and applications. 10.1063/1.4935926
- [36] Krauss, H.; Qualitätssicherung beim Laserstrahlschmelzen durch schichtweise thermografische In-Process-Überwachung; Herbert Utz Verlag; München; 2017. 978-3-8316-7293-6
- [37] Masoomi, M.; Thompson, S. M.; Shamsaei, N.; Quality part production via multi-laser additive manufacturing. 10.1016/j.mfglet.2017.05.003
- [38] Thijs, L.; Verhaeghe, F.; Craeghs, T.; van Humbeeck, J.; Kruth, J.-P.; A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti–6Al–4V. 10.1016/j.actamat.2010.02.004
- [39] Inovar Communications Ltd; Metal AM; Inovar Communications Ltd; 2018
- [40] Zhou, X.; Liu, X.; Zhang, D.; Shen, Z.; Liu, W.; Balling phenomena in selective laser melted tungsten. 10.1016/j.jmatprotec.2015.02.032
- [41] 3faktor; Oberflächenqualität verschiedener Drucktechnologien; <https://3faktor.com/oberflaechenqualitaet-verschiedener-3d-drucktechnologien/>
- [42] Panzl G.; Metallpulvercharakterisierung und Werkstoffuntersuchungen von Stahlwerkstoffen für den Laser Powder Bed Fusion Prozess; Dissertation; Montanuniversität; Leoben; 2020
- [43] Scipioni Bertoli, U.; Wolfer, A. J.; Matthews, M. J.; Delplanque, J.-P. R.; Schoenung, J. M.; On the limitations of Volumetric Energy Density as a design parameter for Selective Laser Melting. 10.1016/j.matdes.2016.10.037
- [44] Michael Molitch-Hou; 7 Issues to Look Out for in Metal 3D Printing; <https://www.engineering.com/story/7-issues-to-look-out-for-in-metal-3d-printing>

- [45] Valeri Ivanov Petkov; Alloy 718 manufactured by AM Selective Laser Melting; Degree Project; University of Technology; Luleå; 2018
- [46] Zhang, D.; Feng, Z.; Wang, C.; Wang, W.; Liu, Z.; Niu, W.; Comparison of microstructures and mechanical properties of Inconel 718 alloy processed by selective laser melting and casting. 10.1016/j.msea.2018.03.073
- [47] Wang, Z.; Guan, K.; Gao, M.; Li, X.; Chen, X.; Zeng, X.; The microstructure and mechanical properties of deposited-IN718 by selective laser melting. 10.1016/j.jallcom.2011.10.107
- [48] EDX Analyse; https://de.wikipedia.org/wiki/Energiedispersive_R%C3%B6ntgenspektroskopie
- [49] Nasschemische Analyse; <https://www.mica-gmbh.de/de/nasschemie/>
- [50] Bürgel H.; Sierak P.; Metallographie an Nickel- und Titanlegierungen aus Flugtriebwerksanwendungen; TAE - Nickel und Titan;
- [51] Imprintec GmbH - Material Testing Solution; Messung von mechanischen Kennwerten; <https://imprintec.de/zugpruefmaschine/>
- [52] William James Sames V; Additive Manufacturing of Inconel 718 Using Electron Beam Melting: Processing, Post-Processing & Mechanical Properties; Dissertation; Texas A&M University; 2015
- [53] Yakout, M.; Cadamuro, A.; Elbestawi, M. A.; Veldhuis, S. C.; The selection of process parameters in additive manufacturing for aerospace alloys. 10.1007/s00170-017-0280-7
- [54] Carpenter Technology <https://www.carpentertechnology.com/blog/nickel-base-superalloy-718-microstructure-characterization>