

Technische Universität Hamburg
Institut für Laser- und Anlagensystemtechnik
Prof. Dr.-Ing. C. Emmelmann

**„Operabilitäts- und Wirkungsgradsteigerung für
zukünftige Turboprop-Triebwerke – Partnervorha-
ben ADDProp: Additive Technologien für Turbo-
prop-Triebwerke“**

Abschlussbericht

Förderkennzeichen: 20T1711B
Laufzeit des Vorha- 01.01.2018 – 31.12.2020
bens:

Projektleiter: Dr.-Ing. Dirk Herzog

Hamburg, 30.06.2021

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
1 Kurzdarstellung der Rahmenbedingungen	3
1.1 Aufgabenstellung	3
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	5
1.4 Stand der Wissenschaft und Technik	7
1.5 Additive Fertigung	7
1.6 Qualitätssicherung (QS)	8
1.6.1 Pre-Prozess-QS	9
1.6.2 Online Prozessüberwachung	10
1.6.3 Post-Prozess-QS	13
1.7 Zusammenfassung	13
1.8 Literatur zum Stand der Wissenschaft und Technik	14
1.9 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	17
2 Eingehende Darstellung	17
2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielten Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	17
2.2 Wichtigste Positionen im zahlenmäßigen Nachweis	30
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	30
2.4 Voraussichtlicher Nutzen	30
2.5 Bekannter Fortschritt bei anderen Stellen	32
2.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichung der Ergebnisse	32

1 Kurzdarstellung der Rahmenbedingungen

Das Ziel des Forschungsvorhabens ADDProp waren Untersuchungen zur Eignung additiver Fertigungsverfahren zur Fertigung von Bauteilen, insbesondere im Bereich der Eintrittsleit-schaukeln. Als kritischer Aspekt für einen späteren Serieneinsatz wurden hierbei insbesondere auf die Qualitätssicherung fokussiert und neue Lösungsansätze für eine in-situ Qualitätssiche-rung betrachtet. Dabei standen die spezifischen Anforderungen im Bereich der Eintrittsleit-räder in Bezug auf Toleranzen, Oberflächen und Werkstoffe im Vordergrund, die mit den aus dem Stand der Technik bekannten Verfahrenen zur Qualitätssicherung im Additiven Fertigungs-prozess nicht oder nur unzureichend erfüllt werden können.

1.1 Aufgabenstellung

Förderpolitisches Ziel des Vorhabens

Übergeordnetes Ziel des Verbunds „ATP-Verd-Tech“ war es, durch eine Leistungssteigerung und der Erweiterung des Betriebsbereichs von Turboprop-Triebwerken diese in größerer Höhe betreiben zu können und damit höhere Wirkungsgrade zu erzielen.

Um diese Entwicklungen zu unterstützen waren die technischen Ziele des Projektes ADDProp daher:

- die Werkstoffauswahl im Bereich Eintrittsleiträder hinsichtlich Anforderungen der additiven Fertigung, insb. des Laserstrahlschmelzens, zu bewerten und zu unterstützen,
- typische beim Laserstrahlschmelzen auftretende Prozessfehler unter Berücksichtigung werkstoffspezifischer Eigenschaften zu kategorisieren
- die Anforderungen an eine Qualitätssicherung für die additive Fertigung von Eintrittsleit-rädern bereitzustellen,
- eine neuartige in-situ Qualitätssicherungsmethode zu erforschen und bereitzustellen, die im additiven Fertigungsprozess die Einhaltung vorgegebener Oberflächenrauheiten und Toleranzen vorhersagt,
- die Fähigkeiten und Grenzen der Qualitätssicherungsmethode zu ermitteln,
- aus dem durch die Qualitätssicherungsmethode gewonnenen, erweiterten Verständnis Generierstrategien abzuleiten, die eine hinsichtlich Oberflächenrauheit und Toleranzen optimierte Bauteilqualität erwarten lassen,
- sowie die neue Qualitätssicherungsmethode an geeigneten Demonstratoren sowie deren Vermessung anhand von nachgelagerten Qualitätssicherungsmethoden zu validie-ren

Des Weiteren war es das Ziel, die übrigen Projektpartner bei der Auswahl und dem Design von additiv zu fertigenden Bauteilen zu unterstützen und Demonstratoren zu fertigen.

Ein zusätzliches, übergeordnetes Ziel des Teilvorhabens war es, den wissenschaftlichen Nachwuchs zu fördern, in dem die Ergebnisse in Lehrveranstaltungen eingebunden werden, und sowohl studentische Arbeiten als auch Promotionen auf dem zukunftssträchtigen Gebiet der additiven Technologien zu ermöglichen.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt ADDProp war ein Teilvorhaben des Verbundvorhabens „APT-Verd-Tech“, welches im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms LuFo V-3 gefördert wurde. Projektpartner innerhalb des Verbundprojektes waren:

- GE Deutschland
- GE Poland
- GE Czech
- TU Braunschweig
- TU Hamburg (iLAS)
- TU Dresden

Die Aufgaben der Technischen Universität Hamburg (TUHH), Institut für Anlagen- und Systemtechnik (iLAS), wurden im Unterauftrag an das Fraunhofer IAPT vergeben.

Für die Durchführung des Teilvorhabens ADDProp standen im Rahmen des Unterauftrages der TU HH an das Fraunhofer IAPT 186.449€ zur Verfügung, die vollständig abgerufen wurden.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

In Abbildung 1 ist die Projektstruktur des Verbundprojekts ATP-VERD-tech dargestellt. Das iLAS (TUHH) ist in Hauptarbeitspaket 2 (HAP 2) des Gesamtprojektes vertreten. Die Schwerpunkte der Forschungsaktivitäten des iLAS sind:

- iLAS: Unterstützung von GE bei der Optimierung von neuartigen Eintrittsleitschaufeln im Hinblick auf Kosten, Wärmeübertragung und Fertigbarkeit; Optimierung des additiven Fertigungsprozesses im Hinblick auf die Anwendbarkeit von Pulverwerkstoffen, die Verbesserung der Oberflächengüte und die Einhaltung von Geometrietoleranzen; Unterstützung von GE bei der Implementierung und Prüfung der Ergebnisse

Die Arbeiten der TUHH (iLAS) gliedern sich in insgesamt 3 Arbeitspakete, die in Abbildung 1 den folgenden Hauptarbeitspaketen (HAP) zugeordnet werden können:

- HAP 2.4-2.5 Eintrittsleitschaufeln Entwicklungs- und Optimierungsprozess
- HAP 2.6 Fertigung und Prüfung der Ergebnisse in GE eigenen Maschinen

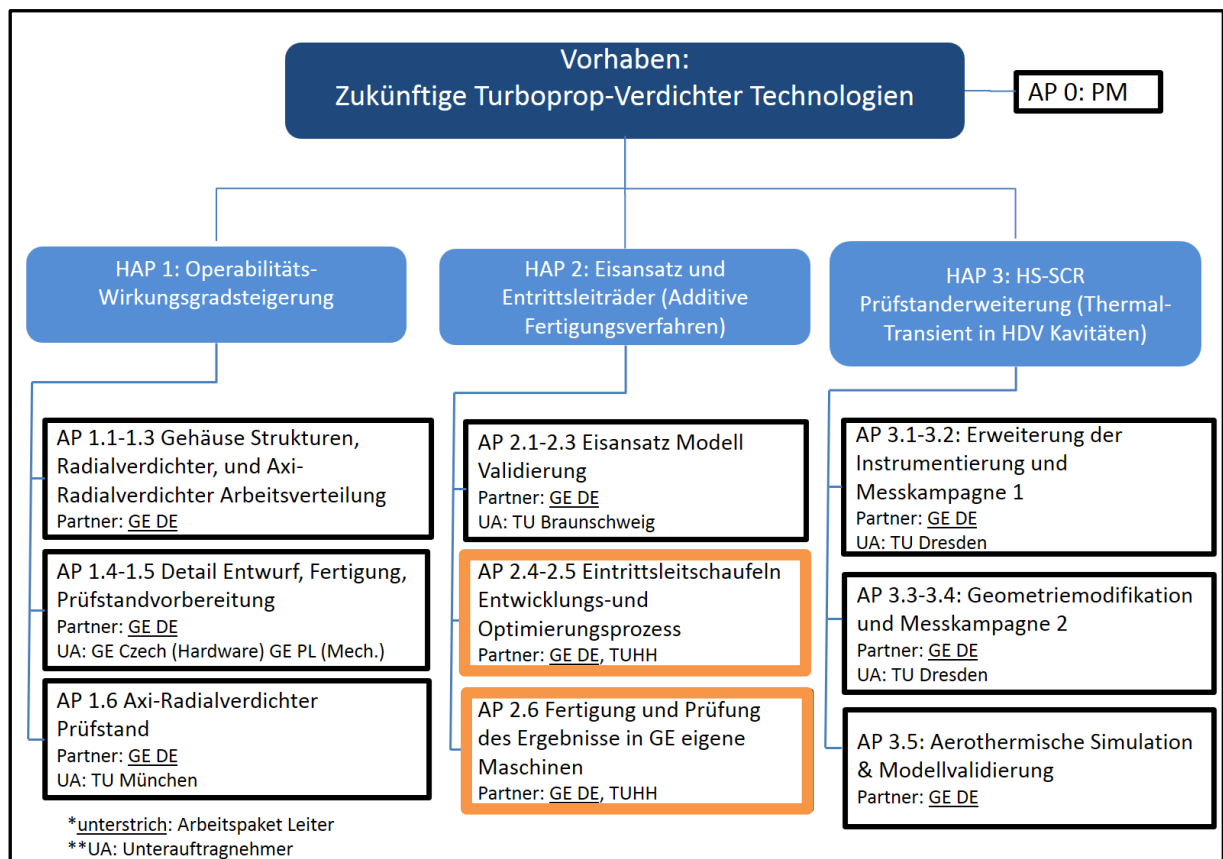


Abbildung 1: Projektstrukturplan mit Eingliederung der TUHH-Arbeitspakete in die Hauptarbeitspakete (HAP) des ATP-VERD-tech Projektes.

Meilensteinplanung

Im Teilvorhaben ADDProp wurden die Arbeitspakete 2.4-2.6 des ATP-VERD-tech Projektes bearbeitet. Dafür wurden detailliertere Meilensteine sowie Arbeitspakete festgelegt. Diese Planung des Teilvorhabens ADDProp sowie der tatsächliche zeitliche Ablauf des Projektes können der Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1: Meilensteine und Arbeitspakete des ADDProp Projektes

		2018												2019												2020													
		Projektmonat																																					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36		
1	Werkstoffauswahl und Anforderungsprofil	Soll																																					
	Ist																																						
2	Entwicklung QS-Methode	Soll																																					
	Ist																																						
3	Evaluierung der Erfassungstechnologie und Prozessemissionen	Soll																																					
	Ist																																						
4	QS-gesteuerte Generierstrategie	Soll																																					
	Ist																																						
5	Bewertung der QS-Methode	Soll																																					
	Ist																																						
6	Umsetzung an Eintrittsleitschaufeln	Soll																																					
	Ist																																						
7	Bewertung der Bauteilqualität	Soll																																					
	Ist																																						
8	Optimierung der QS	Soll																																					
	Ist																																						

	Meilensteine	Zeitpunkt
M1	Anforderungen an die Erfassungstechnologie festgehalten sowie Qualitäts- und Messgrößen abschließend definiert	Monat 12
M2	Vorläufige Übertragung der Ergebnisse auf das GE eigene System	Monat 18
M3	Fehlererkennung mittels Sensorkonzepten erfolgreich am Demonstratorbauteil von GE erprobt/ Kosten Geometrie und Oberflächengüte Prüfung von neuen Eintrittsleitschaufeln	Monat 36

1.4 Stand der Wissenschaft und Technik

In diesem Unterkapitel werden der Stand der Technik der additiven Fertigung allgemein (Kapitel 1.5) und anschließend der relevanten Themengebiete der Qualitätssicherung 1.6) in der additiven Fertigung dargestellt. Abschließend wird in einer Zusammenfassung der Stand der Technik bewertet.

1.5 Additive Fertigung

Die erst seit wenigen Jahren verfügbaren additiven Fertigungsverfahren, wie SLM oder EBM, finden zunehmend Einzug in die industrielle Fertigung. In diesen werkzeuglosen Verfahren wird ein komplexes, dreidimensionales Fertigungsproblem auf mehrere, vereinfachte zweidimensionale Fertigungsschritte reduziert, wodurch sich für den Konstrukteur neue gestalterische Möglichkeiten eröffnen. So lassen sich hochkomplexe, mit Hohlstrukturen oder Hinterschneidungen versehene Strukturen fertigen, die heute bereits in der Medizintechnik (Oberflächen für verbessertes Einwachsverhalten), dem Werkzeugbau (Kühlkanäle, Druckluftauswerfer) und der Luftfahrt (Leichtbau) verwendet werden (Abbildung 1) [Emm11a, Emm11b, Emm13].

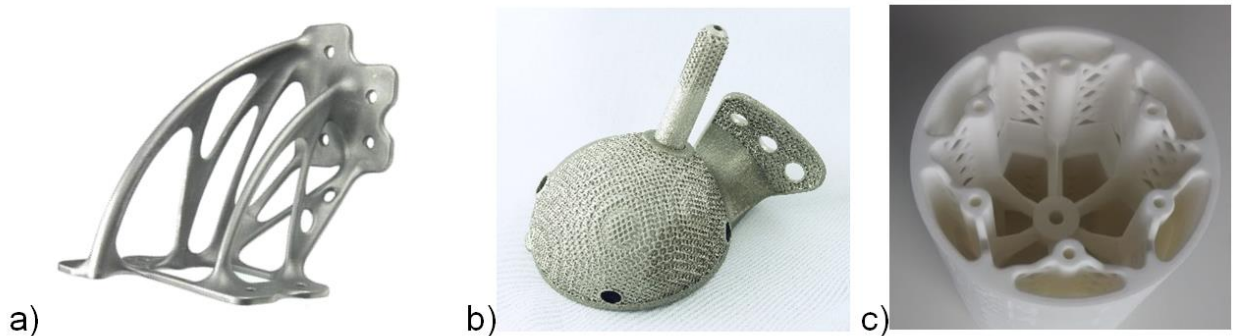


Abbildung 1: Anwendungsbeispiele: a) Flugzeugbracket, b) Hüftpfanne und c) Multifunktionswalze

Im Falle des Laserstrahlschmelzverfahrens werden Bauteile aufgebaut, indem ein pulverförmiges Ausgangsmaterial schichtweise aufgetragen und mit Hilfe eines Laserstrahls mit der vorherigen Schicht ortsselektiv verschweißt wird. Verwendbare Werkstoffe sind im Metallbereich beispielsweise Legierungen aus Titan, Aluminium, Werkzeug- und Edelstähle, Kobalt-Chrom-Legierungen, Nickel-Basislegierungen sowie einige Keramiken [Kru05], [Gib10]. In Abbildung 2 ist die schematische Funktionsweise des ALM-Verfahrens dargestellt.

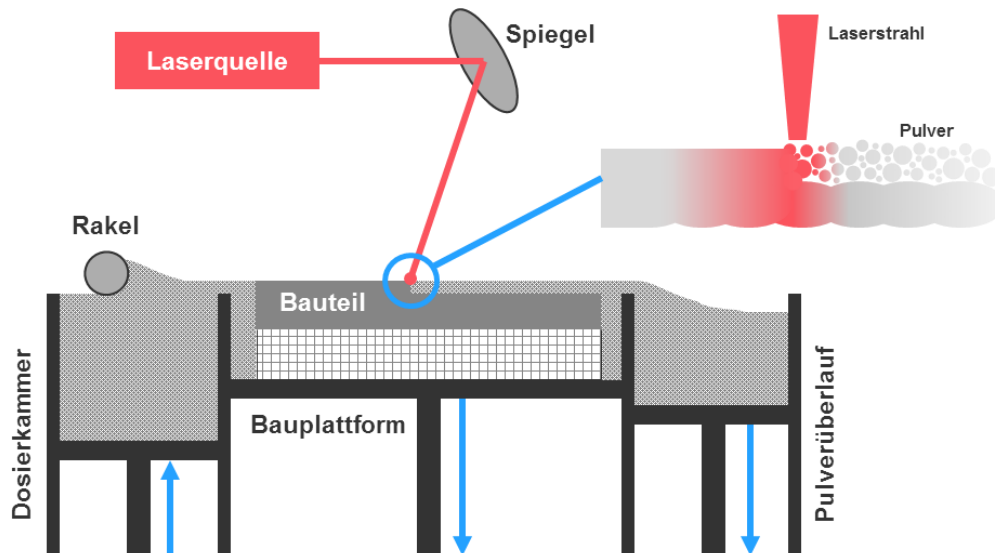


Abbildung 2: Schematische Darstellung des ALM-Prozesses: In einem zyklischen Prozess wird Pulver in definierter Schichtdicke aufgetragen, mit einem Laser ortsselektiv aufgeschmolzen und die Bauplattform um eine Schichtdicke abgesenkt.

1.6 Qualitätssicherung (QS)

Der Technologieausbreitung entgegen steht bis heute die unzureichende Überwachung des Fertigungsprozesses bei gleichzeitig hoher Fertigungsrate, dies ist ein bisher noch ungelöstes Problem, welches sich negativ auf die Kosten und Verlässlichkeit der Produktion auswirkt und somit die Verbreitung der durch deutsche Anbieter dominierten Technologie hemmt. Die auftretenden Defekte lassen sich durch Unregelmäßigkeiten im Schmelzprozess, Fehlern beim Pulverauftrag und thermisch induziertem Verzug zuordnen. Abbildung 3 zeigt drei typische Bauteilfehler.

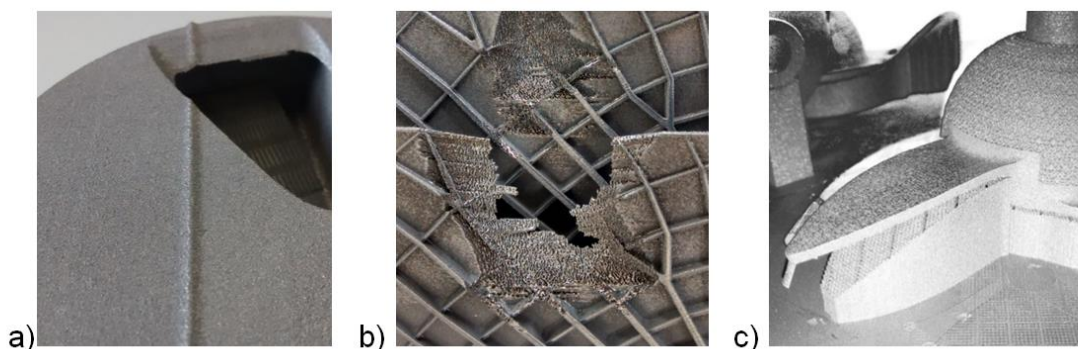


Abbildung 3: Bauteildefekte im ALM Verfahren: a) Linienförmiger Versatz durch fehlerhaften Pulverauftrag, b) Aufbaufehler durch Pulvermangel und c) Verzug durch thermisch induzierte Spannungen und Versagen der Stützstruktur

Durch die hohe Komplexität des ALM-Prozesses, mit Einflüssen von über 50 verschiedenen Variablen, welche sich direkt auf die Beschaffenheit des Bauteils auswirken

können, gestaltet sich die Sicherstellung einer hohen Bauteilqualität allerdings als schwierig. Wie in Abbildung 4 dargestellt, lassen sich Prozessparameter wie z.B. Laserleistung, Scanstrategie oder die Fokusgröße zwar kontrollieren, aber Auswirkungen auf die Schmelzbadgröße und -temperatur oder den Absorptionsgrad des Materials lassen sich bisher nicht sicher vorhersagen. [Spe16]

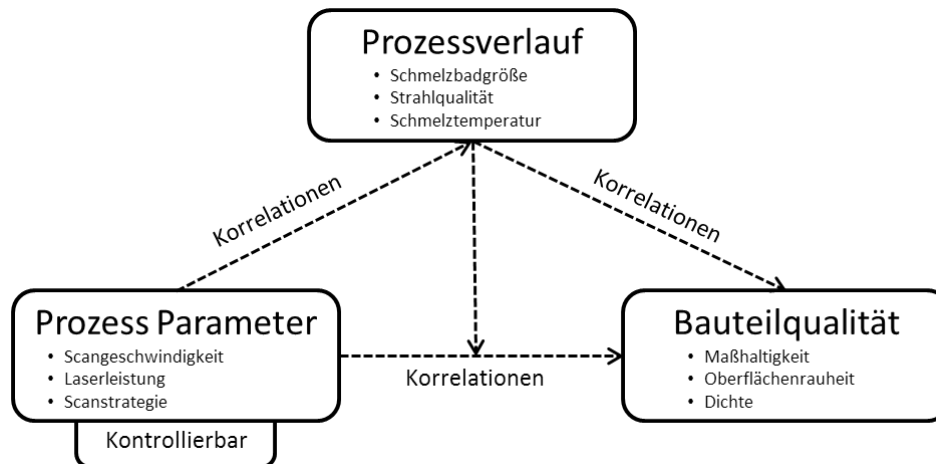


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Zusammenspiels von Prozessparametern, Prozessverlauf und Bauteilqualität (Quelle in Anlehnung an [Spe16])

Um entsprechende Korrelationen zu identifizieren werden in Industrie und Forschung verschiedene Sensoren zur Schicht- und Schmelzbadüberwachung verwendet. Neben der Möglichkeit einer Online-Prozessüberwachung, werden auch Maßnahmen zur Qualitätssicherung vor und nach dem eigentlichen Bauprozess eingesetzt.

1.6.1 Pre-Prozess-QS

Einen fundamentalen Einfluss auf die Bauteilqualität hat die Beschaffenheit des verwendeten Pulvermaterials. Die Pulveranalytik zur Bestimmung der Pulverqualität umfasst u.a. die Messung der Fließfähigkeit, Partikelgrößenverteilung, -morphologie, chemischen Zusammensetzung und der Dichte [Ast14]. Diese Parameter sind entscheidend für die Rakelfähigkeit, den Absorptionsgrad, die Homogenität des Pulverbettes sowie den Wärmetransfer im Material und verändern somit auch die finalen Bauteileigenschaften [Eva05]. So wurde beispielsweise gemessen, dass die Wärmeleitfähigkeit von Nickel im Pulverbett auf Grund der vorliegenden Packungsdichte und Pulverform nur bei $0.272 \text{ W}/(\text{M}^*\text{K})$ lag, wohingegen die Wärmeleitfähigkeit für Nickel in Festkörperform normalerweise auf $90,9 \text{ W}/(\text{M}^*\text{K})$ beziffert wird [Sih93]. Die Beschaffenheit des Pulvers kann sich hierbei im Laufe der Zeit durch Klassieren, Feuchtigkeitsaufnahme oder andere Alterungseffekte ändern [Els11], [Coo12]. Dabei sind die Auswirkungen auf die Bauteilqualität größtenteils unklar. Der Umfang und Aufwand einer umfassenden Pulveruntersuchung scheinen unter derzeitigen Gesichtspunkten als sehr ineffizient in Bezug auf Zeit, Kosten und Arbeitseinsatz [Slo15].

1.6.2 Online Prozessüberwachung

Einer der möglichen Ansatzpunkte ist die Überwachung des Schmelzbades. Dessen physikalische Größe ist abhängig von der eingebrachten Energie. Je mehr Energie eingebracht wird, desto größer wird das Schmelzbad. Hierbei steigt die Wahrscheinlichkeit, dass es an den Grenzen des Schmelzbades zu Satellitenbildungen kommt sowie umliegendes Pulver ansintert und später in einer schlechten Oberflächengüte des Bauteils resultiert. Ist die Energie zu gering kann es zu „Balling-Effekten“ (Schmelzspur zerreißt und zieht sich zusammen) und instabilen Schmelzbädern kommen. Die Stabilität und Form des Bades kann während des Prozesses stark variieren [Kur12].

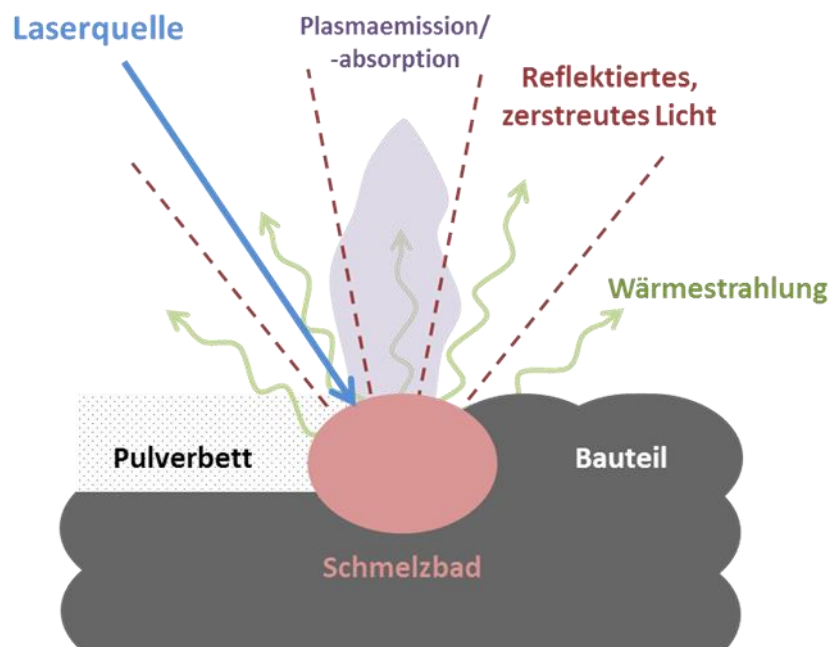


Abbildung 5: Übersicht der elektromagnetischen Wellen während des ALM-Aufschmelzprozesses (Quelle in Anlehnung an [Spe16])

Um Aufschluss über den tatsächlichen Energieeintrag und die Schmelzbadeigenschaften zu erhalten werden die elektromagnetischen Wellen (siehe Abbildung 5) des Schmelzbades und der Plasmawolke mit verschiedenen Sensoren gemessen. Die im ALM-Verfahren eingesetzte Sensorik kann in zwei Klassen unterteilt werden.

- **Räumlich integrierende Strahlungssensoren:** Diese Sensoren nehmen für einen Messfleck endlicher Größe pro Messperiode einen skalaren Wert auf. Zu den Sensoren gehören Halbleiterdioden [Cra10], [Kru05], [Cra11b] und Pyrometer. Halbleiterdioden werden typischerweise montiert, um mittels des Prozessleuchtens Informationen

über den Prozess zu gewinnen. Pyrometer liefern die gemittelte Temperatur in dem beobachteten Messfleck [Bay08]. Räumlich integrierte Sensoren weisen typischerweise Bildfrequenzen um 50 kHz auf und umfassen meist nur einen eingeschränkten Wellenlängenbereich, sodass im Voraus definiert werden muss, welche Strahlungen von Interesse sind. Die Wärmestrahlung des Schmelzbades liegt generell im Bereich der sichtbaren und infraroten Strahlung (900-2300 nm), während die Plasmaemissionen sich Nahe der ultravioletten Strahlung befinden (400-650 nm) [Lot11].

- Räumlich auflösende Strahlungssensoren: Diese Sensoren sind zweidimensionale Detektorarrays und können Strukturen der Bearbeitungsoberfläche darstellen. In Bezug auf den Spektralbereich kann zwischen Kameras zur reinen Strukturerofassung (sichtbarer Bereich) und solchen zur Temperaturerofassung (IR-Bereich) unterschieden werden. CMOS und CCD Kameras ermöglichen durch ihre Auflösung (Pixel) die räumliche Erfassung des Signals und können die Größe des Schmelzbades messen, indem ein definierter Grauwert eines Pixels diesen als erwärmte Fläche identifiziert [Ber10], [Chi10], [Cra11b].

On-Axis-Schmelzbadüberwachung

Zur Überwachung des Schmelzbades können gleich mehrere Sensoren „On-Axis“ installiert werden. Bei einem sogenannten coaxialen Aufbau nutzt der Sensor das gleiche optische System wie der Prozesslaser. Wie in Abbildung 6 dargestellt, ermöglicht der Einsatz eines Strahlteilers Sensoren einen Blick durch die gleiche Fokussier- und Scaneinheit. Somit kann der Sensor dem Laser im Prozess folgen und die elektromagnetischen Wellen des Schmelzbades messen [Lot11].

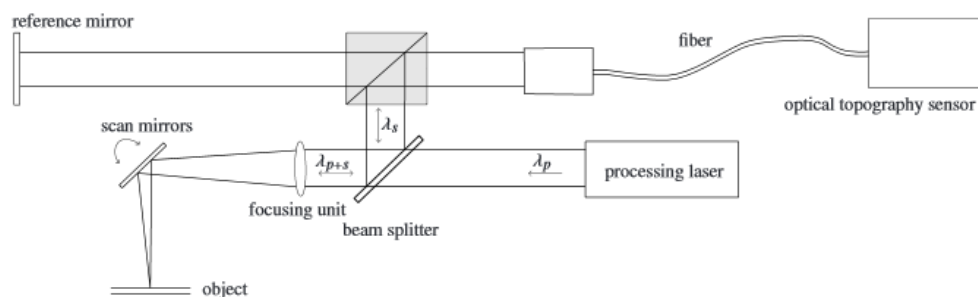


Abbildung 6: Integration des Messstrahls in das Scannersystem der ALM-Anlage

Das Reflektivitätsprofil der verwendeten Spiegel sowie die Verzerrungen der f-theta Linse (oder von anderen Linsen) limitieren allerdings die Aufnahme der zu detektierenden Signale. So müssen die zu messenden Wellenlängen relativ nah am Spektrum des Prozesslasers liegen [Chi10], [Cra11a]. Mit Hilfe dieses Aufbaus und der Verwendung einer Photodiode konnten bereits Unterschiede der Schichtdicke im Prozess sowie Korrelationen zwischen den Messwerten der Diode und dem Grad an Porosität im

Bauteil nachgewiesen werden [Ber10]. Neben dem Einsatz von Dioden und Pyrometern können auch Kameras koaxial montiert werden [Lot11], [Ber10], [Cra10]. Die Messung des emittierten Lichts dient hierbei als Diskriminator für die in das Schmelzbad eingebrachte Energie. Die Form, besonders die Länge des Schmelzbades, kann hingegen Aufschluss über die Anzahl an Eigenspannungen im Bauteil geben. [Yad14] Auch Rayleigh-Instabilitäten, welche in einer Änderung der Schmelzbadeigenschaften resultieren, könnten mit Hilfe des Systems detektiert werden [Das03], [Niu99]. Nachteil des koaxialen Aufbaus und des eingeschränkten „Sichtfensters“ der Sensorik ist, dass keine Aussage über den Verlauf der Solidifikation und Abkühlung des Materials getroffen werden kann [Spe16].

Off-Axis-Schmelzbadüberwachung

Als weitere Prozessüberwachungsmethode können Sensoren Off-Axis im Bauraum montiert werden, wobei diese immer das gesamte Pulverbett im Blick haben. Dadurch werden eine schlechtere räumliche Auflösung und der Einfluss durch perspektivische Fehler in Kauf genommen. Mit diesem Aufbau wird hauptsächlich die Temperatur im Pulverbett gemessen, um beispielsweise Balling-Effekte zu untersuchen [Pur11]. Anders als im Lagrange-Ansatz (On-Axis) kann in diesem eulerischen Vorgehen der thermale Verlauf im Bauteil beobachtet werden. Zudem nutzen diesen Aufbau z.B. Thermokameras, welche in einem anderen Wellenlängenbereich als der Bearbeitungslaser arbeiten, nicht denselben Strahlengang nutzen können und somit gezwungen sind Off-Axis zu detektieren [Bay08], [Fur12], [Isl13], [Kra14a].

Pulverbettüberwachung

Neben der direkten Schmelzbadüberwachung gibt es Ansätze, den Bauraum mit einer hochauflösenden Videokamera in Echtzeit zu überwachen und auszuwerten. Damit können Fehler beim Auftragen der Pulverschicht erkannt werden [Cra11a]. Hierbei werden drei externe Lichtquellen benötigt, da manche Fehler nur unter einem bestimmten Belichtungswinkel zu erkennen sind. Mit diesem System können vor allem Unregelmäßigkeiten im Pulverbett detektiert werden, die zu unsauberen Oberflächenstrukturen führen. Ein weiterer Ansatz ist die Dokumentation des schichtweisen Aufbaus mittels Thermographie [Kra14b]. Um Prozessabweichungen zu ermitteln, wird in diesem Falle eine Bolometer-Kamera verwendet. Zusammengefasst eignet sich die gesamte Wärmeeinflusszone zur Überwachung der verschiedenen Prozessparameter.

Systemüberwachung:

Als weitere QS-Maßnahme werden in den meisten ALM-Anlagen Atmosphären- und Maschinenparameter aufgenommen. Diese müssen innerhalb eines bestimmten Toleranzbereichs liegen, um eine fehlerfreie Produktion zu ermöglichen. Eine Korrelation

zwischen den Messwerten dieser Sensorik und typischen Prozessfehlern besteht allerdings nicht. Zu finden sind in den Maschinen in der Regel Druck-, Sauerstoff-, Temperatur- und/ oder Beschleunigungssensoren [Kle14].

1.6.3 Post-Prozess-QS

Viele der Bauteilfehler wie Lunker, Porositäten, Bindefehler oder feste Einschlüsse sind in einer nachgelagerten Qualitätskontrolle oberflächlich nicht zu erkennen. Für eine zerstörungsfreie Prüfung der Bauteilqualität kommt daher oftmals eine Computertomographie-Analyse zum Einsatz. Auf Grund der zum Teil sehr kleinen Fehlstellen in ALM-Bauteilen im Bereich von $\leq 10\mu\text{m}$ wird in der Regel ein μCT verwendet [Zen14]. Dabei ist eine derartige Kontrolle sehr aufwändig und kostenintensiv. Auch Reparaturmaßnahmen sind in der additiven Fertigung auf Grund der meist hohen Geometrie-Komplexität und der Feinheit der Fehlstellen nur sehr begrenzt möglich, sodass sich mittels μCT nur feststellen lässt, ob es sich bei dem untersuchten Bauteil um ein Gutteil oder Ausschuss handelt [Lot11]. In der gängigen Praxis wird oftmals versucht mit Hilfe von sogenannten Dichtewürfeln als Fertigungsbegleitproben, welche neben den Bauteilen in einem Baujob gedruckt werden, eine Aussage über die Dichte und Qualität der Bauteile zu gewinnen. Diese Dichtewürfel werden plangeschliffen und mittels Auflichtmikroskop auf Porositäten untersucht. Die Ergebnisse dienen allerdings nur als Indikator für die Beschaffenheit der eigentlichen Bauteile. Ob diese tatsächlich fehlerfrei bzw. eine zufriedenstellende Dichte aufweisen ist mit dieser Maßnahme nicht festzustellen. Oftmals wird mittels dieser Untersuchungen versucht iterativ auf die Bauteilqualität einzuwirken, indem bei anschließenden Fertigungen die Prozessparameter entsprechend neu justiert werden. Aufgrund der Vielzahl an Variablen sind Korrelationen zwischen Prozessparametern und der Bauteilqualität auf diese Weise allerdings schwer zu identifizieren.

1.7 Zusammenfassung

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass mittels additiver Fertigung qualitativ hochwertige Teile gefertigt werden können; derzeitige eingesetzte Methoden und Systeme zur Qualitätssicherung allerdings nur eingeschränkt funktionieren. Manuelle, nachgelagerte Prüfungen erscheinen sehr aufwändig und unpraktisch. Ein in-situ-Prozessmonitoring zur Sicherung der Bauteilqualität hinsichtlich Oberflächenrauigkeit und Toleranzen existiert nicht. Dies liegt zum einen am bisher nur rudimentär ausgebildeten Wissen über Korrelationen der zahlreichen Einflussvariablen auf die Güte des Endproduktes, zum anderen an fehlenden Hard- und Softwarelösungen zur Fehlerdetektion sowie der Fehlerinterpretation.

1.8 Literatur zum Stand der Wissenschaft und Technik

- [Ast14] ASTM F3049-14: Characterizing Properties of Metal Powders Used for Additive Manufacturing Processes (2014), doi: 10.1520/F3049-14.
- [Ber10] Berumen, S.; Bechmann, F.; Lindner, S.; et al.: Quality control of laser- and powder bed-based additive manufacturing (AM) technologies. *Phys Procedia* 5:617–622 (2010), doi:10.1016/j.phpro.2010.08.089.
- [Bay08] Bayle, F.; Doubenskaia, M.: Selective laser melting process monitoring with high speed infrared camera and pyrometer. In: *Fundamentals of Laser Assisted Micro- and Nanotechnologies*. International Society for Optics and Photonics (2008), ISBN 978-0-81947-183-3.
- [Coo12] Cooke, A. L.; Slotwinski, J.A.: Properties of Metal Powders for Additive Manufacturing: A Review of the State of the Art of Metal Powder Property Testing (2011), doi: 10.6028/NIST.IR.7873.
- [Cra10] Craeghs, T.; Bechmann, F.; Berumen, S.; Kruth, J.-P.: Feedback control of Layer-wise Laser Melting using optical sensors. *Physics Procedia* 5, Part B (2010), S. 505-514.
- [Cra11b] Craeghs, T.; Clijsters, S.; Yasa, E.; Bechmann, F.; Berumen, S.; Kruth, J.-P.: Determination of geometrical factors in layerwise laser melting using optical process monitoring. *Optics and Lasers in Engineering* 49 (2011), Nr. 12, S. 1440-1446.
- [Cra10] Craeghs, T.; Bechmann, F.; Berumen, S.; Kruth, J.-P.: Feedback control of Layer-wise Laser Melting using optical sensors. *Physics Procedia* 5, Part B (2010), S. 505-514.
- [Chi10] Chivel, Y; Smurov, I.: On-line temperature monitoring in selective laser sintering/melting. *Phys Procedia* 5:515–521 (2010), doi:10.1016/j.phpro.2010.08.079.
- [Cra11a] Craeghs, T.; Clijsters, S.; Yasa, E.; Kruth, J.-P.: Online quality control of selective laser melting. In: *22nd Annu. Int. Solid Free. Fabr. Symp. - An Addit. Manuf. Conf. SFF 2011*. University of Texas at Austin (2011), pp. 212–226.
- [Das03] Das, S.: Physical aspects of process control in selective laser sintering of metals. *Adv Eng Mater* 5 (2003), pp. 701–711.

- [Emm11a] Emmelmann, C.; Sander, P.; Kranz, J.; Wycisk, E.: Laser additive manufacturing and bionics: Redefining lightweight design. *Physics Procedia* 12, Part A (2011), S. 364-368.
- [Emm11b] Emmelmann, C.; Scheinemann, P.; Munsch, M.; Seyda, V.: Laser additive manufacturing of modified implant surfaces with osseointegrative characteristics. *Physics Procedia* 12, Part A (2011), S. 375-384.
- [Emm13] Emmelmann, C.; Klahn, C.; Beckmann, F.; Hofmann, S.; Dinkel, M.: Laser additive manufacturing of gas permeable structures. *The Laser User* 72 (2013).
- [Eva05] Evans, R. S.; Bourell, D. L.; Beaman, J. J.; Campbell, M. I.: SLS materials development method for rapid manufacturing. In: 16th Solid Free. Fabr. Symp. University of Texas at Austin, Austin (2005), pp. 184–196.
- [Els11] Elsen, M. Van: Complexity of Selective Laser Melting: a new optimization approach. Katholieke Universiteit Leuven, Leuven (2007).
- [Fur12] Furumoto, T.; Alkahari, M. R.; Ueda, T.; Aziz, M. S. A.; Hosokawa, A.: Monitoring of Laser Consolidation Process of Metal Powder with High Speed Video Camera. *Physics Procedia* (2012), 39(0), pp. 760-766.
- [Gib10] Gibson, I.; Rosen, D. W.; Stucker, B.: *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. Springer (2010).
- [Isl13] Islam, M.; Purtonen, T.; Piili, H.; Salminen, A.; Nyrhilä, O.: Temperature Profile and Imaging Analysis of Laser Additive Manufacturing of Stainless Steel. *Physics Procedia* (2013), 41(0), pp. 835-842.
- [Kle14] Kleszczynski, S.; zur Jacobsmühlen, J.; Reinarz, B.; Sehart, J. T.; Witt, G.; Merhof, D.: Improving process stability of laser beam melting," *Proc. Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference (DDMC)*, A. Demmer, ed., Fraunhofer Verlag (2014).
- [Kra14a] Krauss, H.; Zeugner, T.; Zäh, M. F.: Detecting process irregularities in selective laser melting by thermography. *Proc. Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference (DDMC)*, A. Demmer, ed., Fraunhofer Verlag (2014).
- [Kra14b] Krauss, H., Eschey, C. und Zaeh, M.F.: Thermography for Monitoring the Selective

- [Kru05] Kruth, J.-P.; Vandenbroucke, B.; Van Vaerenbergh, J.; Mercelis, P.: Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques. (2005).
- [Kru05] Kruth, J.-P.; Vandenbroucke, B.; Van Vaerenbergh, J.; Mercelis, P.: Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques. (2005).
- [Kur12] Kurzynowski, T.; Chlebus, E.; Kuźnicka, B.; Reiner, J.: Parameters in selective laser melting for processing metallic powders. *Adv Slow Fast Light V* (2012), doi: 10.1117/12.907292.
- [Lot11] Lott, P.; Schleifenbaum, H.; Meiners, W.; et al.: Design of an optical system for the in situ process monitoring of Selective Laser Melting (SLM). *Phys Procedia* 12:683–690 (2011), doi:10.1016/j.phpro.2011.03.085.
- [Niu99] Niu, H. J.; Chang, I. T. H.: Instability of scan tracks of selective laser sintering of high speed steel powder. *Scr Mater* 41 (1999), pp.1229–1234
- [Pur11] Purtonen, M.; Islam T.; et al.: Temperature profile and imaging analysis of laser additive manufacturing of stainless steel, In: *Physiscs Procedia* 41 (2013), S. 835-842.
- [Spe16] Spears, T.; Gold, S.; In-process sensing in selective laser melting (SLM) additive manufacturing. (2016), doi: 10.1186/s40192-016-0045-4, S.1-11
- [Sih93] Sih, S. S.; Barlow, J. W.: The measurement of the thermal properties and absorp-tances of powders near their melting temperatures. In: *3rd Solid Free. Fabr. Symp. University of Texas at Austin* (1993), pp. 131–140.
- [Slo15] Slotwinski, J. A.; Garboczi, E. J.: Metrology needs for metal additive manufacturing powders. *JOM* 67:538–543 (2015), doi:10.1007/s11837-014-1290-7.
- [Spe16] Spears, T.; Gold, S.; In-process sensing in selective laser melting (SLM) additive manufacturing. (2016), doi: 10.1186/s40192-016-0045-4, S.1-11
- [Yad14] Yadroitsev, I.; Krakhmalev, P.; Yadroitsava, I.: Selective laser melting of Ti6Al4V alloy for biomedical applications: Temperature monitoring and microstructural evolution. *J Alloys Compd* 583:404–409 (2014), doi:10.1016/j.jallcom.2013.08.183.

1.9 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Innerhalb des Projektes gab es eine enge Zusammenarbeit insbesondere mit dem Projektpartnern GE Aviation.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielten Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die wesentlichen Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete sind in den folgenden Abschnitten dargestellt.

AP 2.5.1 Bewertung der Werkstoffauswahl und des Anforderungsprofils für eine neuartige in-process-QS

Die Auswahl der geeigneten prozessfähigen Werkstofflegierung wurde getroffen: Es wird im weiteren Verlauf die Legierung Ti-6Al-4V verwendet. Die für den Projektpartner GE Aviation und das Fraunhofer IAPT infrage kommenden Materialien waren die Legierungen CuNi2SiCr (C 18000) und Ti-6Al-4V (Ti64). Deren werkstoffinhärente Eigenschaften sowie die praktische Umsetzbarkeit wurden verglichen. Die umzusetzende Geometrie ist die Eintrittsleitschaufel eines Turboproptriebwerkes mit integrierten Heizkanälen.

Die Kupferlegierung C 18000 hat eine weitaus höhere Wärmeleitfähigkeit [MS/m] (Ti64: 6,9; C 18000: 190-240), jedoch ist sie Ti64 hinsichtlich wichtiger mechanophysikalischer Eigenschaften, wie Härte HB (Ti64:326; C 18000:229) und Dichte [g/cm³] (Ti64: 4,45; C 18000: 8,84) unterlegen.

Ti64 ist eine der am häufigsten vom Fraunhofer IAPT verarbeiteten Legierungen. Sie findet aufgrund der sehr vorteilhaften mechanischen Eigenschaften und der relativ einfachen Schweißbarkeit Anwendung in einer Vielzahl an Bauteilen aus nahezu allen bedienten Branchen wie der Medizintechnik, der Automobilindustrie und der Luftfahrtindustrie. Dementsprechend kann das Fraunhofer IAPT auf ein erhebliches Knowhow hinsichtlich dieses Materials zurückgreifen.

Die am Fraunhofer IAPT vorhandenen Anlagen sind neben anderen Materialien auf Ti64 ausgerichtet. Sollte eine Anlage für C 18000 umgerüstet werden, müssten erhebliche Aufwände betrieben werden, die mit hohen Kosten verbunden sind: Aktuell ist in der Anlage ein Laser mit einer Wellenlänge von 1064 nm verbaut (Nd:YAG-Festkörperlaser). Laserstrahlung dieser Wellenlänge wird gut von Ti64 absorbiert (Absorptionskoeffizient: 74%), wodurch die Strahlungsenergie zum Großteil in Hitze zum Aufschmelzen des Pulvers umgewandelt wird. C 18000 absorbiert nur etwa 4% der Strahlung dieser Wellenlänge, die restlichen 96% werden gestreut und reflektiert. Dies führt zu einer sehr geringen Aufheizung des Pulvers und zum Risiko einer Beschädigung der Umgebung durch zufällig gerichtete Strahlung.

Die Umrüstung einer Anlage mit einem Laser, der eine von C 18000 besser absorbierbare Strahlung emittiert, erfordert die Anschaffung eines neuen Lasers und das kost-

spielige Auswechselln vieler optischer Komponenten, da deren Eigenschaften Wellenlängenabhängig sind. Darüber hinaus würde die Verarbeitung anderer Materialien sehr erschwert werden, da diese bei der für C 18000 günstigen Wellenlänge schlechtere Absorptionseigenschaften aufweisen.

Deshalb wurde in Abstimmung mit dem Projektpartner GE Aviation, entschieden Ti64 zu verwenden. Zur Validierung der Materialauswahl wurden erste Proben gedruckt.

Ein Fehlerkatalog prozessbedingter Bauteilfehler im AM-Prozess wurde erstellt. Dafür wurde eine umfassende Literaturrecherche mit Fokus auf den neuesten zentralen Veröffentlichungen und Erkenntnissen durchgeführt. Aufgrund der unterschiedlichen Definitionen des Begriffes „Defekt“ wurde eine sinnvolle eigenständige Definition entwickelt: Ein Defekt ist jede Art von Abweichung vom gewünschten Zustand des fertigen Bauteils (, also nicht die Ursachen für diese Abweichungen oder andere Phänomene).

Auf dieser Grundlage wurde eine ausführliche Tabelle erstellt, die die folgenden Aspekte enthält:

- Defekte (incl. Charakterisierung)
- Ursachen für jeden Defekt
- Defektkategorie
- Sensorprinzipien zur Erkennung der Defekte (aufgeteilt in In- und Post-Process-Methoden)
- Aktuell auf dem Markt verfügbare Sensoriken
- Defektpriorisierung per Bildung von Risikoprioritätszahlen

Defekte mit der höchsten Priorisierung sind Poren, die hauptsächlich durch lokal zu hohe oder zu niedrige Temperaturen im Schmelzbad entstehen und Oberflächenrauheit, dessen Ursprung meist Hitzeakkumulation am Bauteilrand sowie Stufeneffekte darstellen. Aufgrund der übergeordneten Relevanz für den Projektpartner und des hohen Innovationspotenzials hinsichtlich einer neuartigen Sensorik soll besonders die Rauheit soll in folgenden Arbeitspaketen im Fokus stehen.

Die Gegenüberstellung zeigt, dass die vorgegebenen Ziele des Arbeitspaketes erreicht wurden:

- Ein Fehlerkatalog prozessbedingter Bauteilfehler im AM-Prozess wurde angefertigt
- Eine Auswahl der geeigneten, prozessfähigen Werkstofflegierung wurde getroffen
- Eine erste Identifikation der Fehlerursprünge hat stattgefunden (Output)

AP 2.5.2 Entwicklung einer neuartigen in-process-QS-Methode zur Prädiktion von Oberflächenrauigkeiten und Toleranzen

Ausgehend von den Ergebnissen aus Arbeitspaket 2.5.1 wurde der Entwicklungsfokus auf die Erkennung von Prozesszuständen gelegt, die zur Ausbildung hoher Oberflächenrauheit führen. Zu diesem Zweck eignet sich die Verwendung einer Photodiode, die im Strahlengang integriert ist (siehe Abbildung 8) als Messmodul.

Das Konzept für die neuartige In-Situ-Qualitätssicherungsmethode ist die Verwendung einer Photodiode im Strahlengang und die Entwicklung von neuartigen Algorithmen zur Separation und selektiven Auswertung der Messdaten. Der Sensor ermöglicht die Erfassung der Schmelzpoolmissionen an jedem Ort des Bauteiles. So werden Aussagen zu kritischen Prozesseigenschaften möglich.

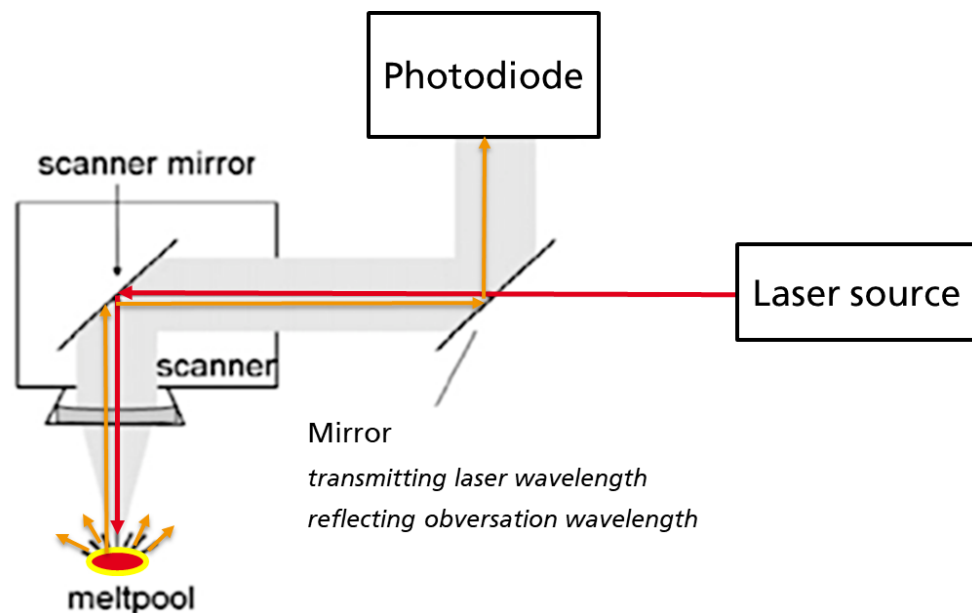


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Messsystems

Technisch wurde dieses Konzept durch den Einbau eines teildurchlässigen Spiegels im ursprünglichen Strahlengang einer umgesetzt. Durch diesen kann die Laserstrahlung mit der diskreten Strahlungswellenlänge von 1070 nm annähernd ungehindert hindurchtreten. Die zu messenden thermischen Emissionen, die vom Schmelzbad ausgehen, unterscheiden sich zum Großteil von dieser Wellenlänge. Ein Teil der Emissionen verläuft genau entgegengesetzt der Laserstrahlung durch das optische System und wird von dem teildurchlässigen Spiegel hin zur Photodiode reflektiert.

Zur Umsetzung des Ansatzes wurde die photodiodenbasierte Sensorik in den Strahlengang einer modifizierten Anlage der SLM Solutions AG (SLM 250) integriert, die als Versuchsanlage diente.

Die Gegenüberstellung zeigt, dass die vorgegebenen Ziele des Arbeitspaketes erreicht wurden:

- Ein Konzept der neuartigen In-Situ-QS in einer Versuchsanlage wurde erstellt
- Das QS-System wurde in einer geeigneten Versuchsanlage integriert (Output)

AP 2.5.3 Evaluierung der Prozessemission und passende Erfassungstechnologie als Datengrundlage für die in 2.5.2 entwickelte QS-Methode

Es wurden dünnwandige Probekörper unterschiedlicher Wanddicke designt und hergestellt, um die entsprechenden Prozessemissionen von solchen Strukturen hervorzu-rufen, da die finale Geometrie der Eintrittsleitschaufel besonders im funktionskritischen luftumströmten Bereich der finalen Geometrie diese Strukturen aufweist (s. Abbildung 9).

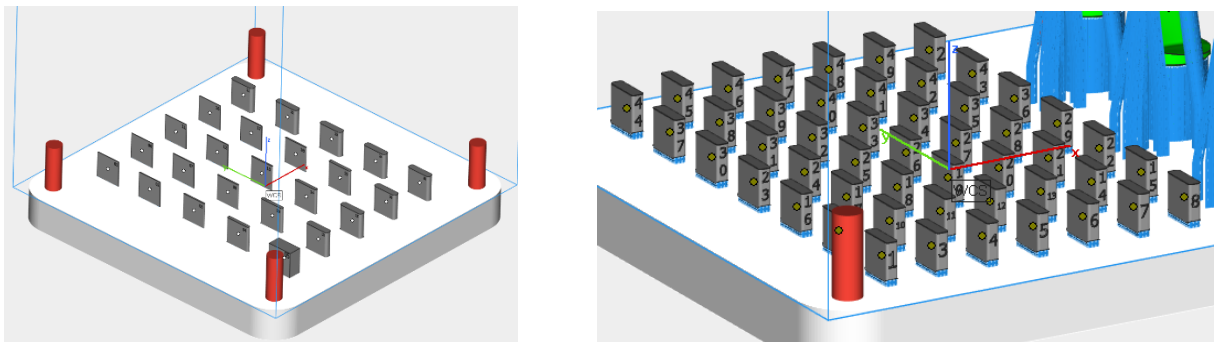


Abbildung 8: Designs von Probekörpern zu Nachbildung der Prozessbedingungen bei der Fertigung der Eintrittsleitschaufeln

Bei der Anfertigung der Probekörper wurden die Prozessemissionen mit der Photodiode aufgenommen sowie dreidimensional dargestellt (s. Abbildung 9).

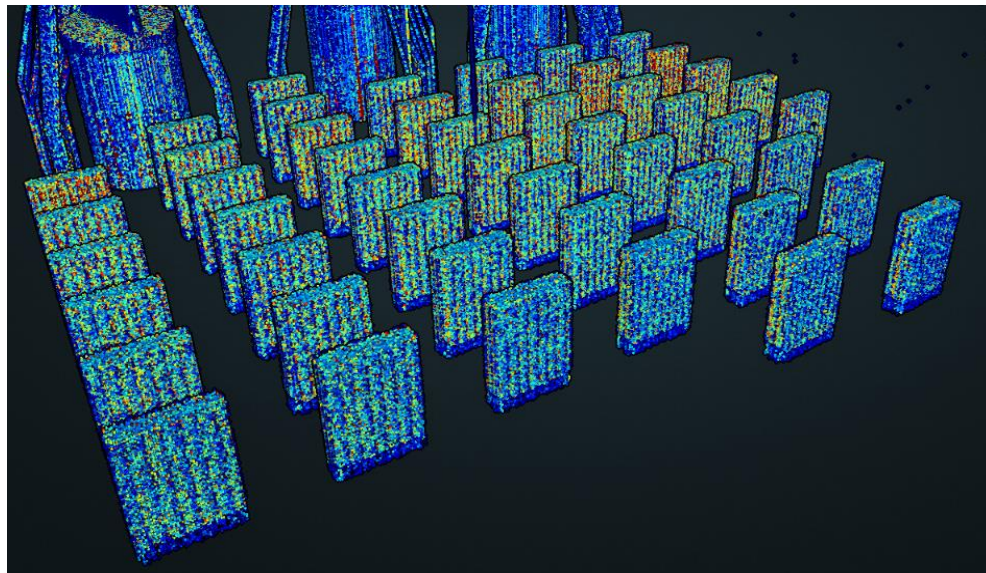


Abbildung 9: Räumlich zugeordnete Prozessemissionen, die durch die Photodiode aufgenommen wurden. Die Darstellung basiert auf den Rohdaten.

Zur Extrahierung von aussagekräftigen Informationen aus den Rohdaten war die Entwicklung entsprechender Algorithmen nötig. Nur dadurch ließen sich die mehrere hundert Gigabyte großen Datensätze pro Baujob auf eine sinnvolle Größe reduzieren und die Qualitätsrelevanten Daten auswerten.

Der Algorithmus erkennt, wann die Kontur und die Schraffur während der Belichtung fertiggestellt wurden und filtert die Daten entsprechend. In diesem Fall erhält er nur die

Daten der Schmelzbademissionen, die während der Konturerzeugung entstehen. Das Arbeitsprinzip dieses Algorithmus beruht darauf, dass prozessbedingt die Schraffur getrennt von der Kontur gescannt wird. Zunächst isoliert er die Daten jedes einzelnen Teils auf der Bauplatte, wie in Abbildung 10 (links) gezeigt. Durch das Entfernen der Datenpunkte, die im Zeitraum der Erzeugung der innenliegenden Schraffur generiert wurden, bleiben nur die Konturdaten übrig. Diese können im Anschluss für weitere Analysen abgespeichert oder wie in Abbildung 10 (rechts) dargestellt werden.

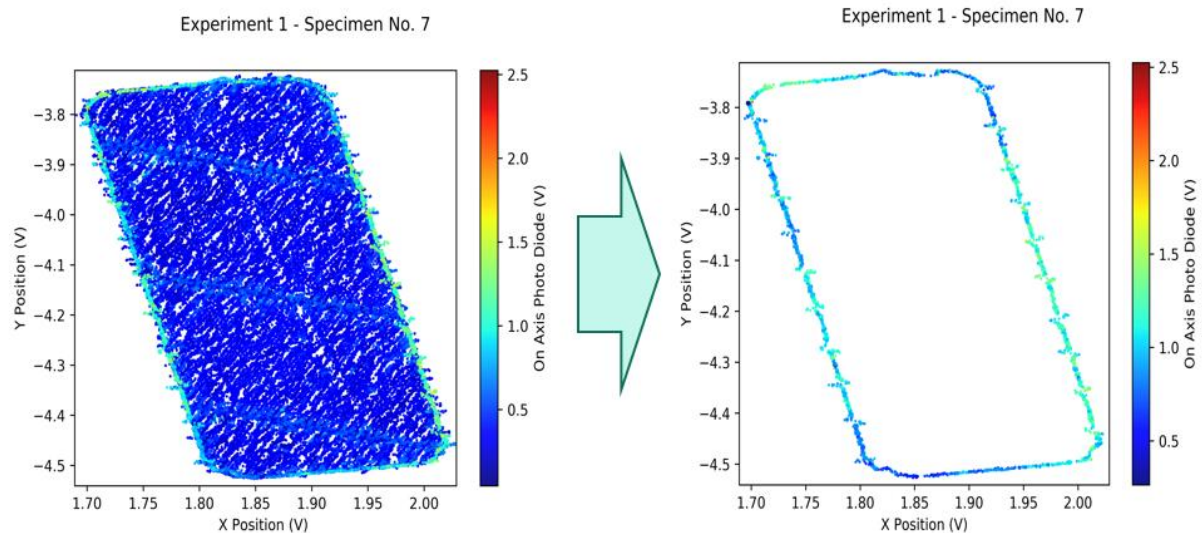


Abbildung 10: Photodiodendaten unverarbeitet (links), aus Rohdaten extrahierte Konturdaten

Sobald die Konturdaten isoliert sind, werden alle Spannungen addiert und durch die Länge der Kontur geteilt, um sie mit anderen Schichten im selben Teil und mit anderen Teilen vergleichbar zu machen. Auf diese Weise wird die Konturwärmeabstrahlung (Engl.: Contour Energy Emission CTE) berechnet, die sich aus der Summe aller Spannungen (als Ausgabegröße der Photodiode) in der Kontur dividiert durch die Länge der Kontur ergibt, wie in Formel 1 beschrieben. Diese Information gibt ein Bild über die Charakteristik der Kontur und kann für die Untersuchungen dieser Studie eingesetzt werden.

Formel 1: Formel für die Berechnung der Konturwärmeabstrahlung (Engl.: Contour Energy Emission CTE)

$$CTE = \frac{\sum_1^n V_{Contour}}{L_{Contour}}$$

Für die in AP 2.5.1 definierten Fehler wurden durch eine Literatur- und Marktrecherche die Möglichkeiten der Detektion auf Basis der verfügbaren Messwerte der Photodiode gesammelt. Hierbei konnte die Erkenntnis gewonnen werden, dass es bis jetzt keine Sensortechnologie gibt, die in der Lage ist, alle Fehler zu erkennen – auch eine Photodiode ist dazu nicht in der Lage. Die Bauteileigenschaften sind nicht ausschließlich vom Aufschmelzprozess abhängig.

Mit Hilfe von Photodiodenbasierten Sensoren lassen sich prinzipiell alle von thermischen Ursachen abhängigen Defekte (Porenbildung, Spannungen etc.) erfassen, was bislang an der Datenauswertung scheitert.

Es wurden Bewertungsalgorithmen entwickelt, mit denen für Bauteilabweichungen ursächliche Veränderungen in der Wärmesignatur nachgewiesen werden.

Die Gegenüberstellung zeigt, dass die vorgegebenen Ziele des Arbeitspaketes erreicht wurden:

- Bewertungsalgorithmen zur Detektion von Bauteilfehlern auf Basis von QS-Emissionen wurden entwickelt

AP 2.5.4 Entwicklung einer QS-gesteuerten Generierstrategie zur Herstellung in-process-qualitätsgesicherter Bauteile hinsichtlich Oberflächenrauigkeiten und Toleranzen

Für die in AP 2.5.1 definierten Fehler wurden durch eine Literatur- und Marktrecherche die Möglichkeiten der Detektion auf Basis der verfügbaren Messwerte der Photodiode gesammelt. Hierbei konnte die Erkenntnis gewonnen werden, dass es bis jetzt keine Sensortechnologie gibt, die in der Lage ist, alle Fehler zu erkennen – auch eine Photodiode ist dazu nicht in der Lage. Die Bauteileigenschaften sind nicht ausschließlich vom Aufschmelzprozess abhängig.

Mit Hilfe von photodiodenbasierten Sensoren lassen sich prinzipiell alle von thermischen Ursachen abhängigen Defekte (Porenbildung, Spannungen etc.) erfassen, was bislang an der Datenauswertung scheitert.

Es wurden Bewertungsalgorithmen entwickelt, mit denen für Bauteilabweichungen ursächliche Veränderungen in der Wärmesignatur nachgewiesen werden (siehe AP2.5.3). Diese bieten das Potenzial, das Auftreten von problematischen Vorgängen während des Prozesses nachzuweisen, um aufwendige nachgelagerte Qualitätssicherungsverfahren zu vermeiden.

Die Technologie einer Photodiode, die im Strahlengang integriert ist (siehe AP 2.5.2), zeichnet sich im Vergleich zu alternativen Technologien aus folgenden Gründen besonders aus:

1. Anordnung im Strahlengang ermöglicht Erfassung von Signalen, die fast ausschließlich vom Schmelzbad emittiert werden
2. Hochgenaue Positionsinformation des Signales im dreidimensionalen Raum
→ Der SLM-Prozess ermöglicht die Kenntnis von der Position und dem entsprechenden Zeitpunkt des aufschmelzenden Laserspots auf der Bauebene. Diese Information lässt sich mit dem Zeitverlauf der Photodiode koppeln, wodurch das momentane Sichtfeld (Engl.: FOV) errechnet werden kann.
3. Eine hohe Messfrequenz (100 kHz) ermöglicht eine sehr hohe Auflösung und die Erfassung zeitlich sehr begrenzter Phänomene der Schmelzbaddynamik
4. Durch den relativ geringen Preis von Photodioden ist eine spätere industrielle Anwendung realistisch

Keine andere Technologie ist in der Lage, diese QS-relevanten Merkmale in einem Messmodul abzudecken.

Die Gegenüberstellung zeigt, dass die vorgegebenen Ziele des Arbeitspaketes erreicht wurden:

- Ein neuartiger multikriterieller Qualitätssicherungsprozess für den Generierprozess wurde festgelegt

AP 2.5.5 Bewertung der neuartigen QS-Methode an geeigneten Demonstratorbauteilen

Der grundlegende Ansatz für die QS-Methodik ist es, die Schmelzbademissionen während des additiven Fertigungsprozesses aufzunehmen und nach Fertigstellung des Baujobs auszuwerten. Für diese Auswertung müssen die anfangs sehr großen Datenmengen gefiltert werden, sodass nur Daten mit Relevanz für eine Aussage über die Rauheit im Weiteren verwendet werden können. Danach wurde der entwickelte Algorithmus zur Berechnung von Emissionskennwerten entwickelt, eine Verknüpfung zur Rauheit ermöglicht, ohne die Notwendigkeit, nachgelagerte Messungen durchführen zu müssen.

Während der Fertigung der Leitschaufeln konnte ein vollständiges Abbild der Prozessmissionen generiert werden. Diese wurden anschließend in Bezug auf Formabweichungen mit Fokus auf die Rauheit interpretiert. Es konnten erste Korrelationen zwischen der Wärmesignatur und den Formabweichungen am Bauteil nachgewiesen werden, die als Mittel zur Vorhersage genutzt werden können.

Eine uneinheitliche Schutzgasströmung führt neben anderen Effekten, wie beispielsweise der vermehrten Ablagerung von Schmelzpartikeln auf dem Pulverbett, zu einer geringeren Hitzeabfuhr, was in einer Überhitzung der Probekörper und damit in einer vermehrten Anhaftung von Partikeln resultiert. Diese angehafteten Partikel können als Rauheit detektiert werden. Dieses Phänomen konnte auf in diesem AP 2.5.5 auf der Versuchsanlage und im weiteren Verlauf des Projektes auch auf der industriellen Anlage beobachtet werden.

Es konnte gezeigt werden, dass während des Aufbaus ein charakteristischer Wärmeverlauf stattfindet. Abweichungen davon könnten zukünftig als Hinweis auf unerwünschte thermische Phänomene interpretiert werden. In den Versuchen konnte gezeigt werden, dass beispielsweise eine Unterbrechung des Baujobs im charakteristischen Wärmeverlauf zu erkennen ist (siehe Abbildung 11).

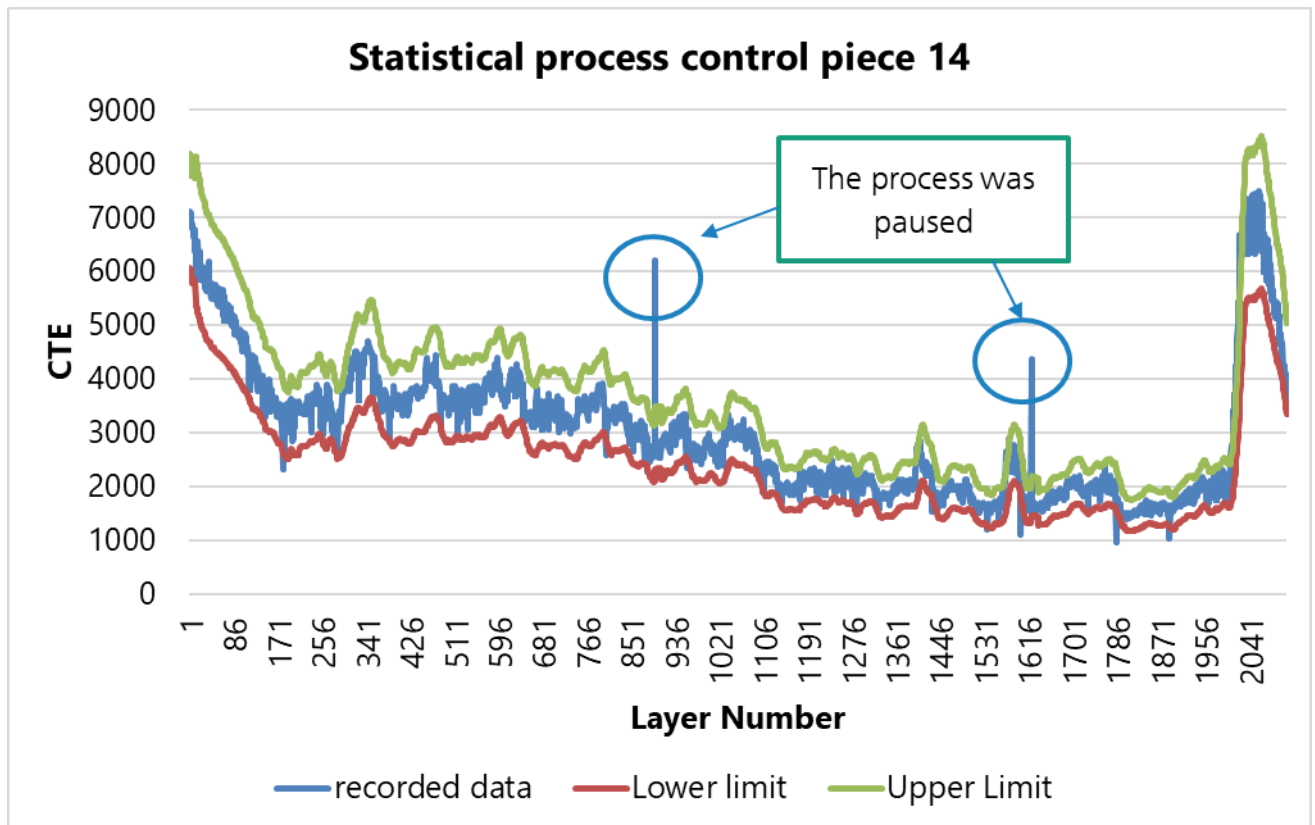


Abbildung 11: Charakteristische Wärmesignatur von der Fertigung eines Probekörpers. Das Einfügen von oberen und unteren Kontrollimits ermöglicht die Anwendung von statistischer Prozesskontrolle

Es kann anhand des Messsignales eine zentrale Ursache für Formabweichungen am Bauteil quantifiziert detektiert werden. Durch die Verwendung von Prozessemissionsgrenzwerten kann eine unerwünscht hohe Bauteilrauheit vermieden werden.

Abweichungen von den Sollwerten der Bauteileigenschaften können dadurch prinzipiell ohne nachgelagerte Untersuchungen bestimmt werden. Insbesondere das Konzept des Vergleiches von Emissionssignaturen wird als aussichtsreich betrachtet: Zunächst wird ein Bauteil gefertigt, dessen Fehlerfreiheit durch nachträgliche Untersuchungen bewiesen wird. Die Prozessemissionen darauf folgend gefertigter Bauteile werden mit denen des fehlerfreien Teiles verglichen. Abweichungen von der Prozesssignatur des Gutteils können als Hinweis auf schlechte Bauteileigenschaften gedeutet werden. Dieses Verfahren ist auch mit dem QMMeltpool-System auf einer Concept Laser M2 möglich. Dieser Anlagentyp ist im industriellen Umfeld weit verbreitet und eignet sich dadurch als beispielhafte Produktionsmaschine. Um die bisherigen Entwicklungen auf diese Anlage zu übertragen wurden die entwickelten Algorithmen aus AP 2.5.3 auf das neue Datenformat der Concept Laser M2 Anlage angepasst.

Die Gegenüberstellung zeigt, dass die vorgegebenen Ziele des Arbeitspaketes erreicht wurden:

- Die prototypische QS-Generierstrategie wurde am realen AM-Prozess getestet
- Die prinzipielle Funktionsweise des QS-Generierstrategie wurde validiert (Output)

AP 2.5.6 Prototypische Umsetzung der neuartigen QS-Methode an den optimierten Eintrittsleitschaufeln

Die finale Entwicklung des QS-Systems und der Fehlererkennung wurde auf der industriell verwendeten Anlage „Concept Laser M2“ demonstriert. Exemplarisch für eine Ursache ungenügender Rauheit wurde der Einfluss der Position von Probekörpern auf der Bauplattform genauer untersucht. Dafür wurden neben den Eintrittsleiträdern zunächst kleinere Probekörper mit identischen Belichtungsparametern gedruckt, die in hoher Stückzahl auf der gesamten Bauplattform positioniert wurden (siehe Abbildung 12). Auf diese Weise konnten Bereiche mit unterschiedlichen Prozessemissionen ermittelt werden.

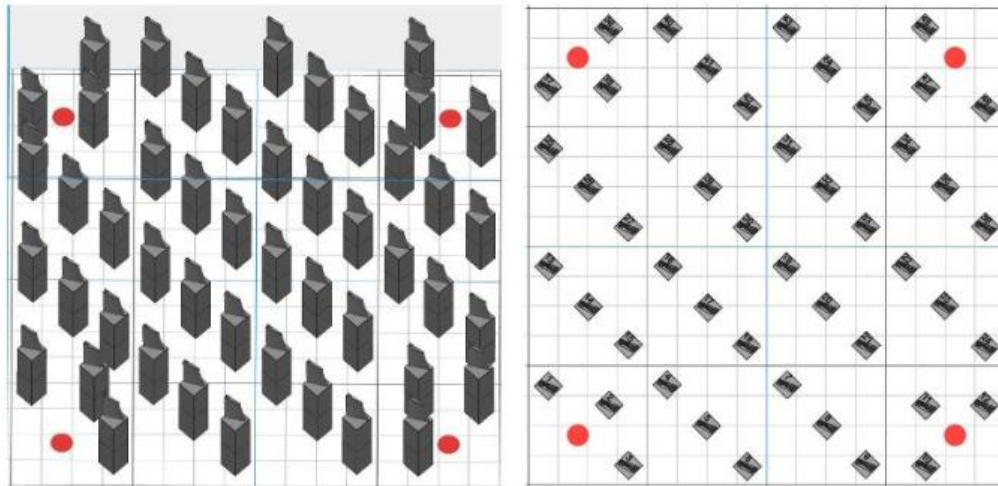


Abbildung 12: Einfache Probengeometrien zur Bestimmung der Abhängigkeit zwischen Position auf der Bauplattform und der Rauheit.

In Abbildung 13 wird ersichtlich, dass Zonen auf der Bauplattform existieren, in denen bei gleichen Parametern der CTE-Wert höher oder niedriger ist.

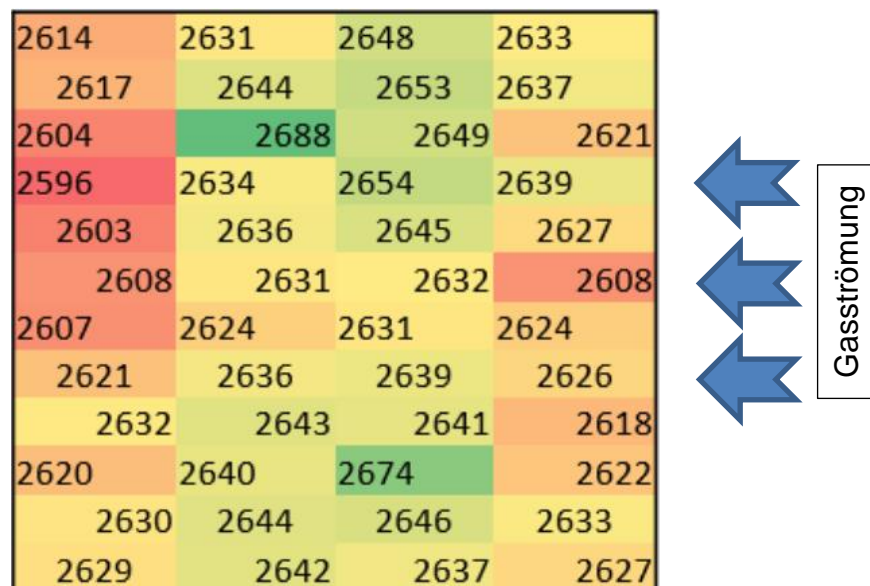


Abbildung 13: CTE der einfachen Probekörper, abhängig von der Position auf der Bauplattform

Neben diesen Probekörpern wurden auch die finalen Geometrien der Eintrittsleitschaufeln gedruckt (siehe Abbildung 14). Ein Hauptziel dabei war die Überprüfung, ob die QS-gestützte

Generierstrategie auch bei komplexeren Geometrien fähig ist, Emissionsunterschiede in Abhängigkeit von der Position auf der Bauplattform nachzuweisen.

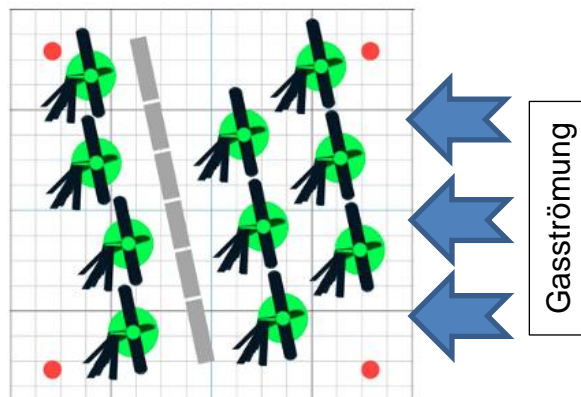


Abbildung 14: Anordnung für den Druck der Geometrien der Eintrittsleitschaufeln

Die Auswertung der Emissionssignale zeigt, dass auch für die Eintrittsleitschaufeln ein signifikanter Unterschied in der Emissionssignatur abhängig von der Position auf der Bauplattform vorherrscht. Allerdings zeigt ein Vergleich der Signaturen der Eintrittsleitschaufeln und jener der Probekörper nur wenig Gemeinsamkeiten bezüglich der Position auf der Bauplattform.

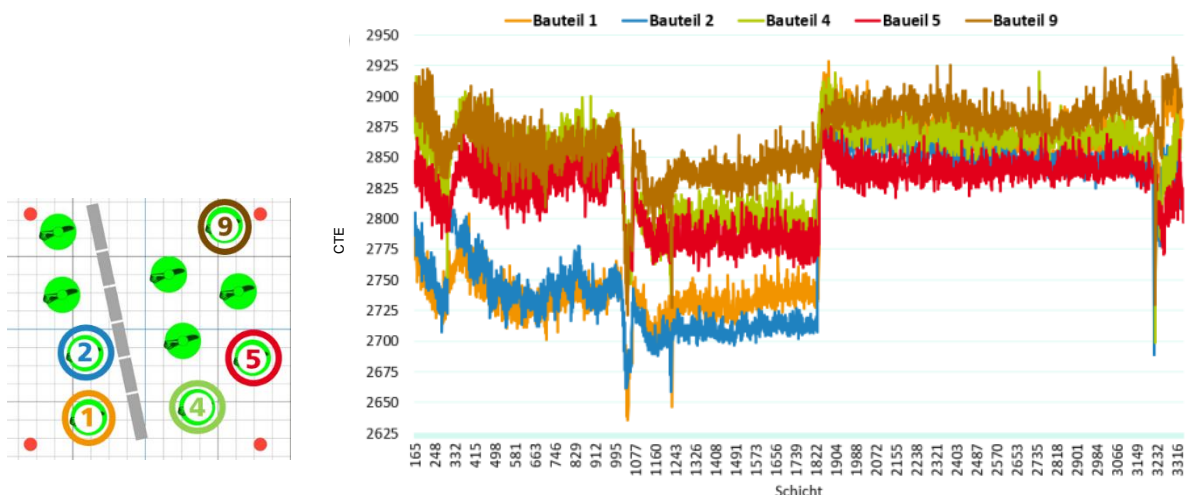


Abbildung 15: CTE der Eintrittsleitschaufeln, abhängig von der Position auf der Bauplattform

Die Gegenüberstellung zeigt, dass die vorgegebenen Ziele des Arbeitspaketes erreicht wurden:

- Die konzipierten Demonstratorbauteile wurden produziert
- In Bezug zu AP 2.5.7 wurde überprüft ob und in welchem Maße Fehler im Prozess auftreten
- Es wurden Vorversuche (einfache Probengeometrien) und Offlineanalysen durchgeführt (Output)

AP 2.5.7 Bewertung der Bauteilqualität durch eine nachgelagerte Qualitätssicherung

In diesem AP wurden die in AP 2.5.6 angefertigten Probekörper geometrisch Vermessen. Dies wurde durch die Nutzung eines Perthometers (MARSURF XR 20 MIT, Mahr GmbH) umgesetzt, da es im Vergleich zur Lasertriangulation eine höhere Genauigkeit aufweist und im Vergleich zur konfokalen Lasermikroskopie erheblich größere Bereiche vermessen kann und damit statistisch verlässlichere Aussagen erlaubt.

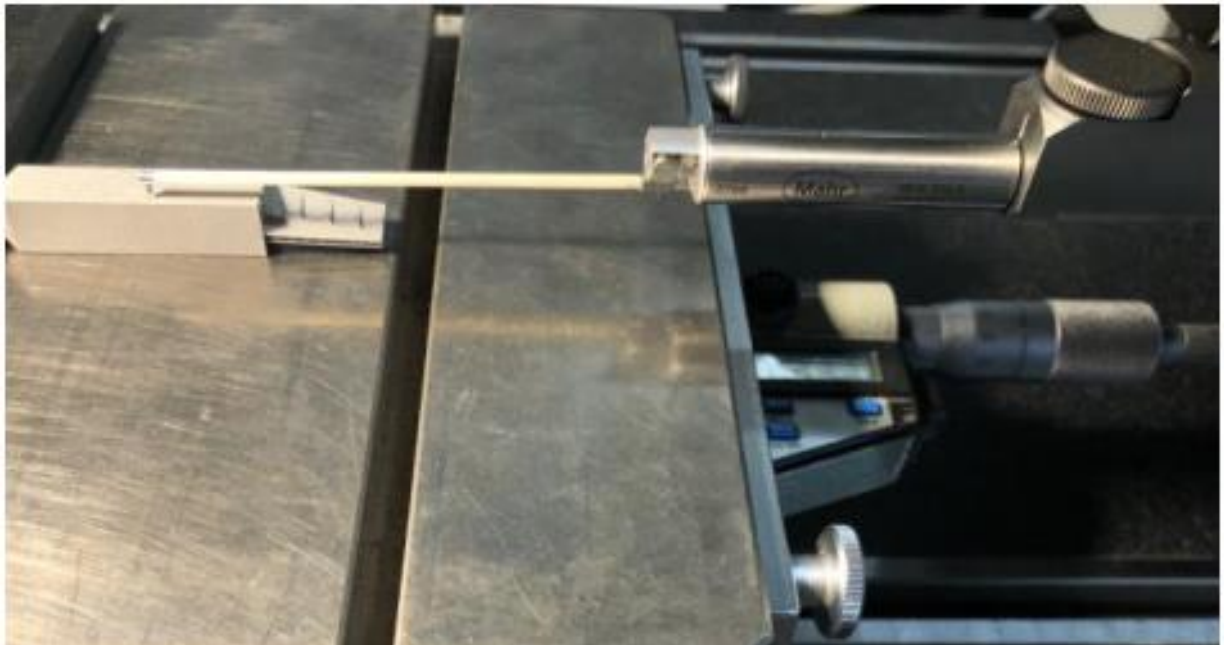


Abbildung 16: Perthometrische Vermessung der Probekörper

Die Auswertung der einfachen Probenkörper aus AP 2.5.6, Abbildung 12 zeigt trotz gleicher Fertigungsparameter erhebliche Unterschiede bezüglich der Rauheit. Die unterschiedlichen Rauheiten sind Abhängig von der Position auf der Bauplatform, was sich durch eine inhomogene Schutzgasströmung über der Bauebene erklären lässt.

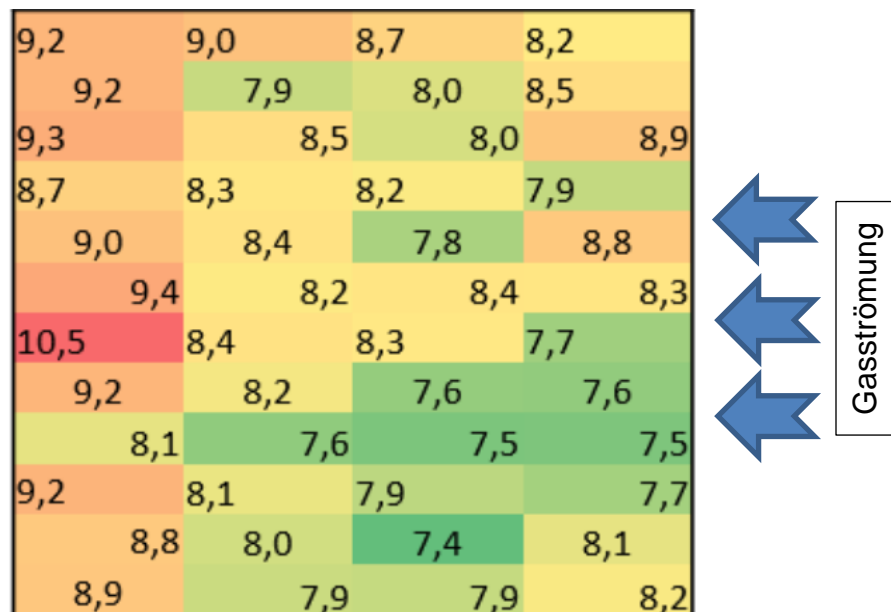


Abbildung 17: Rauheit (Ra) der einfachen Probengeometrien in Abhängigkeit von der Position auf der Bauplatform

Der Vergleich der Probekörper hinsichtlich des CTE-Wertes mit deren Rauheit zeigt mit einem Korrelationskoeffizienten von -0,47 eine relativ gute Korrelation mit negativem Zusammenhang.

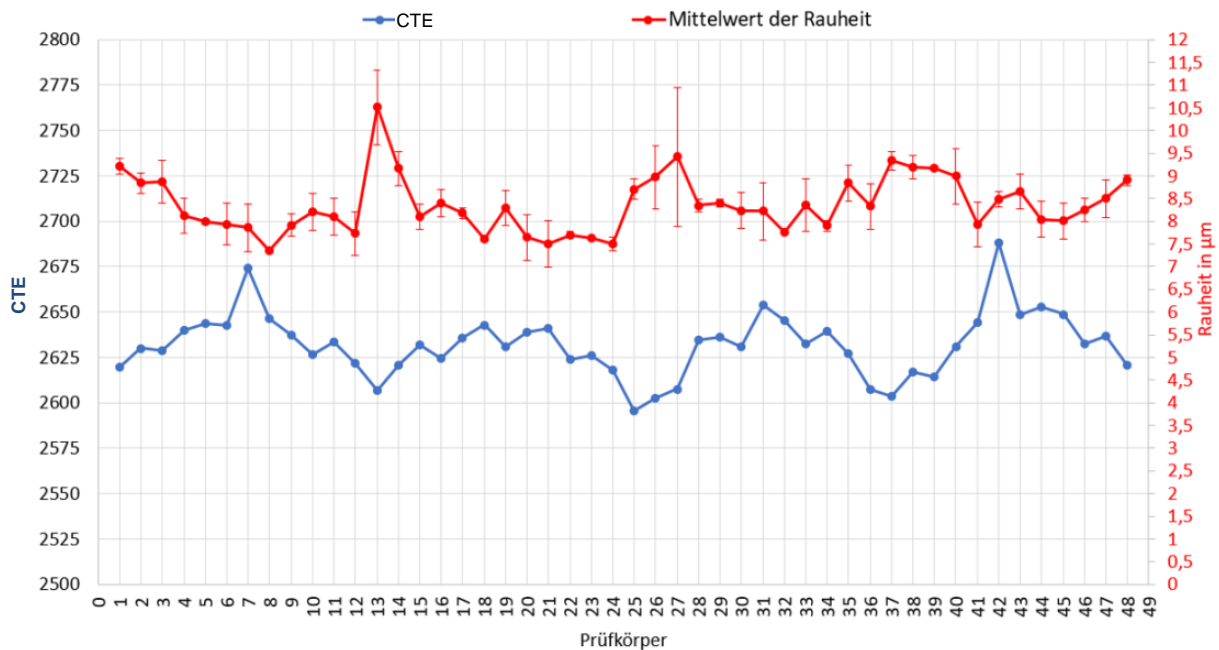


Abbildung 18: Vergleich des CTE und der Rauheit der einfachen Probekörper in Abhängigkeit von der Position auf der Bauplattform

Die Vermessung der Eintrittsleitschaufeln wurde ebenfalls perthometrisch durchgeführt. Auch bei diesen Probekörpern konnte ein Unterschied in der Rauheit festgestellt werden (siehe Abbildung 19).

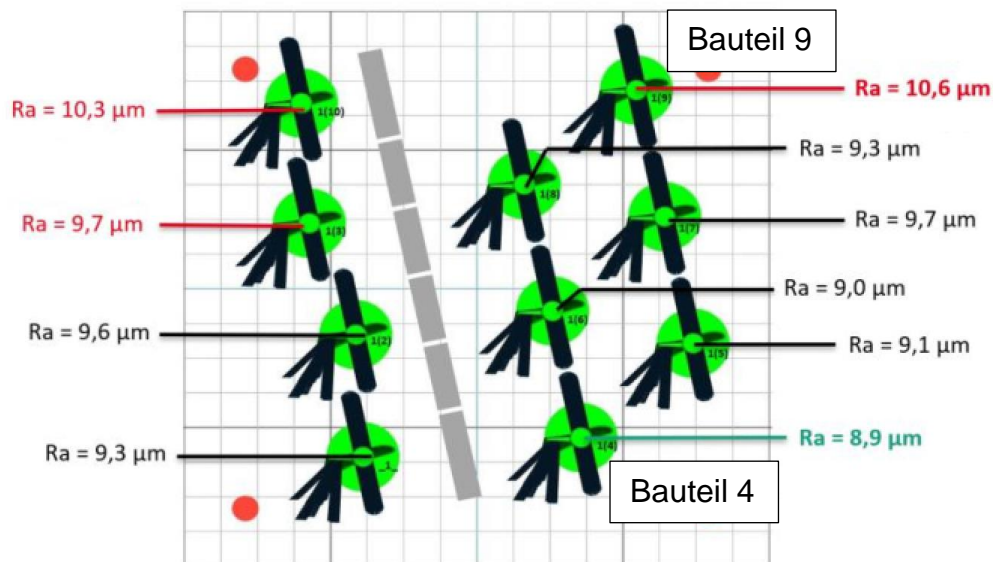


Abbildung 19: Rauheit (Ra) der Eintrittsleitschaufeln in Abhängigkeit von der Position auf der Bauplattform

Der Vergleich der Probekörper hinsichtlich des CTE-Wertes mit deren Rauheit zeigt im Gegensatz zu den einfachen Probekörpern augenscheinlich keinen belastbaren Zusammenhang. Der exemplarische Vergleich von Bauteil 4 mit Bauteil 9 (siehe Abbildung 15) zeigt, dass der Rauheitsunterschied mit $Ra = 1,7 \mu\text{m}$ der größte unter allen Proben ist, die Wärmesignaturen sich aber nur wenig voneinander unterscheiden.

Die Gegenüberstellung zeigt, dass die vorgegebenen Ziele des Arbeitspaketes erreicht wurden:

- Es wurde eine quantitative Bewertung der neuartigen In-Situ-QS durchgeführt
- Die Analyse und Auswertung der Demonstratorbauteile wurde abgeschlossen

AP 2.5.8 Optimieren der Qualitätssicherung und des Fertigungsprozesses anhand der experimentellen Validierung

Die Ergebnisse aus AP 2.5.7 zeigen, dass die Qualitätssicherungsstrategie der Überwachung des SLM-Prozesses mit Hilfe einer Photodiode das Potenzial hat, wichtige Einflussgrößen für die Rauheit von Bauteilen zu überwachen (bspw. vom Soll abweichende Temperatur der Bauteile, bedingt durch ungünstige Schutzgasströmung). Allerdings zeigt sich, dass die Messsignale und deren Auswertungsalgorithmen aktuell noch nicht in der Lage sind, die Wärmesignaturen von komplexen Bauteilgeometrien in direkten Bezug zu deren Rauheit zu bringen. Eine Optimierung der Bauteileigenschaften hinsichtlich der Gestaltabweichungen ließ sich deshalb zum aktuellen Entwicklungsstand nicht durchführen.

Mit der Weiterentwicklung der Technologie bezüglich der Auflösung der Auswertealgorithmen sowie einer gesteigerten Messfrequenz verspricht das entwickelte QS-System, ein sinnvoller Baustein für das übergeordnete Ziel einer ganzheitlichen Produktions- und Qualitätsüberwachung in der additiven Fertigung zu sein. Insbesondere die technisch gesehen relativ einfache Integrierbarkeit einer Photodiode im optischen Strahlengang sowie die Kosten machen diese Methodik attraktiv für zukünftige Weiterentwicklungen.

Der Optimierungsansatz für das Prototypische QS-Modul umfasst aus vor diesem Hintergrund die folgenden Elemente:

1. Steigerung der Abtastrate der Photodiode zur höher aufgelösten Erfassung der dynamischen Prozesse während des Schmelzvorganges
2. Verbesserung der Algorithmen zur Beschreibung relevanter Prozesscharakteristika, wie zum Beispiel Schmelzbadturbulenzen, Keyhole-Modus, Bezug zum Verlauf der Belichtungsvektoren (Vektoranfang, Vektormitte, Vektorende)
3. Entwicklung komplexerer Auswertealgorithmen, beispielsweise Neuronale Netze (CNN)
4. Simultane Erfassung weiterer signifikanter Einflussgrößen, wie beispielsweise das Auftreten von Spratzern oder der Pulvereigenschaften (Feuchtigkeit, Größenverteilung etc.)

Diese Ansätze konnten bereits teilweise umgesetzt werden. So wurde in der experimentellen SLM 250 AM-Anlage eine Photodiode höherer Abtastrate installiert und ein Teil der qualitätsrelevanten Einflussgrößen wird zusammen mit den Prozessemissionen an einem zentralen Speicherort zusammengeführt, damit langfristig diese Messwerte mit zusammenfassenden Algorithmen ganzheitlich analysiert werden können.

Die Gegenüberstellung zeigt, dass die vorgegebenen Ziele des Arbeitspaketes erreicht wurden:

- Ein optimiertes QS-System für den AM-Prozess wurde konzipiert und z.T. umgesetzt

2.2 Wichtigste Positionen im zahlenmäßigen Nachweis

Vergabe von Aufträgen (0835) – 186.449,00€

Die Bearbeitung der Projektinhalte wurde in Abstimmung mit dem Projektträger im Unterauftrag an das Fraunhofer IAPT vergeben. Entsprechend sind die Kosten ausschließlich Position 0835 zuzuordnen.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Für die hier dargestellte Technologieentwicklung zur Qualitätssicherung laseradditiv gefertigter Bauteile mit spezifischen Anforderungen an die Oberflächenrauheit und Toleranzen ist ein hoher Forschungsbedarf festzustellen. Um eine derartige Methode zu entwickeln, wird ein grundlegendes Verständnis der Einflussfaktoren auf die Bauteilqualität und die Detektionsfähigkeit der Qualitätssicherungsmethode benötigt. Der mit diesen wissenschaftlich-technischen Fragestellungen einhergehende Untersuchungsumfang und das darin enthaltene technische Risiko sind als hoch einzustufen, so dass eine Entwicklung durch die TUHH alleine nicht zu leisten ist. In einem direkten (ungeförderten) Auftrag z.B. durch GE, wäre das Vorhaben durch wirtschaftliche Zwänge nicht in dieser Tiefe und nicht mit den hier dargestellten wissenschaftlichen Fragestellungen durchführbar. Zudem blieben i.d.R. die Ergebnisse uneingeschränkt dem Auftraggeber vorbehalten, wodurch eine weitere Wissensverbreitung und Übertragung der Erkenntnisse auf andere Anwendungen und Branchen ausgeschlossen wäre.

Die Zusammenarbeit in einem Verbundvorhaben bietet die Möglichkeit, die Kompetenzen der Partner zu bündeln und die dargestellte komplexe Aufgabe gemeinsam zu lösen. Eine Zuwendung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen des zivilen Luftfahrtforschungsprogramms ist daher notwendig.

Dem großen Potential der additiven Fertigung steht eine derzeit geringe Anwendung in der Serienfertigung gegenüber, was auf mehrere Ursachen zurückzuführen ist:

1. fehlendes Know-how sowie Tools zum fertigungsgerechten Design von AM-Bauteilen
2. Schwierigkeiten bei der Auswahl geeigneter Bauteile für die Serienfertigung
3. Probleme in der Qualitätssicherung und Reproduzierbarkeit in der Serienfertigung
4. hohe Fertigungskosten auf Grund geringer Produktivität
5. Geringe Oberflächengüten nach dem Laserschmelzen, sodass eine Oberflächennachbearbeitung (bspw. Fräsen, Ätzen,...) mindestens an Funktionsflächen erforderlich ist
6. fehlendes Wissen bzgl. der Qualitätssicherung und damit verbunden ein hoher Aufwand für diese
7. geringe Integration von AM in konventionelle Wertschöpfungs- und IT-Ketten

Die Arbeiten in dem Projekt ADDProp haben dazu beigetragen, insbesondere die Hürden 3, 5 und 6 zu überwinden.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen

Die TUHH strebt eine Verwertung der Ergebnisse im Sinne des Projektantrages an. Erste Ergebnisse wurden auf der anerkannten DDMC 2020 präsentiert und somit allen Unternehmen in diesem Feld zugänglich gemacht. Eine Verwertung der Ergebnisse auf Konferenzen nach Projektende wird ebenfalls durchgeführt, sodass die vollständige Verwertung aller Inhalte erst in wenigen Jahren abgeschlossen sein wird.

Die Tabelle 2-1 zeigt die wichtigsten Ergebnisse und bereits vorhandene Veröffentlichungen sind in Kapitel 2.6 aufgeführt.

Tabelle 2-1: Wesentliche Ergebnisse im Projekt ADDProp sowie deren Nutzen

Arbeitspaket	Ergebnis	Voraussichtlicher Nutzen
AP1 Werkstoffauswahl und Anforderungsprofil	<ul style="list-style-type: none"> - Ein Fehlerkatalog prozessbedingter Bauteilfehler im AM-Prozess wurde angefertigt - Eine Auswahl der geeigneten, prozessfähigen Werkstofflegierung wurde getroffen - Eine erste Identifikation der Fehlerursprünge hat stattgefunden 	Basierend auf dem Fehlerkatalog wurden neue Konzepte für Sensorik für die Prozessüberwachung entwickelt. Diese sind in die Projekte SenseAI (FKZ: 02P20A101), Enabl3D (FKZ: 03LB5000A) sowie weitere in Beantragung befindliche Projekte eingeflossen.
AP2 Entwicklung QS-Methode	<ul style="list-style-type: none"> - Ein Konzept der neuartigen In-Situ-QS in einer Versuchsanlage wurde erstellt - Das QS-System wurde in einer geeigneten Versuchsanlage integriert 	Das In-Situ-QS-Konzept ist in das Projekt SenseAI eingeflossen. Die Kenntnisse über Integration der Messtechnologie werden für die Aktivitäten in diesem Projekt angewendet.
AP3 Evaluierung der Erfassungstechnologie und Prozessemissionen	<ul style="list-style-type: none"> - Bewertungsalgorithmen zur Detektion von Bauteilfehlern auf Basis von QS-Emissionen wurden entwickelt 	Die Bewertungsalgorithmen können in den bereits genannten Projekten als Grundlage für deren Weiterentwicklung dienen. Darüber hinaus kann durch die Filterung der Datenmengen eine Integration in multiparametrische Datenbanken effizienter erfolgen.
AP4 QS-gesteuerte Generierstrategie	<ul style="list-style-type: none"> - Ein neuartiger multikriterieller Qualitätssicherungsprozess für den Generierprozess wurde festgelegt 	Die Erfahrungen aus dem erprobten QS-Ansatz dienen allen genannten Projekten als Grundlage für weitere Entwicklungen. Die Kenntnisse über die Zusammenhänge von Prozessemissionen und Rauheit lassen sich in die Prozessüberwachungsmethoden der geplanten Aktivitäten integrieren und steigern somit deren Aussagekraft.
AP5 Bewertung der QS-Methode	<ul style="list-style-type: none"> - Die prototypische QS-Generierstrategie wurde am realen AM-Prozess getestet - Die prinzipielle Funktionsweise des QS-Generierstrategie wurde validiert 	
AP6 Umsetzung an Eintrittsleitschaufeln	<ul style="list-style-type: none"> - Die konzipierten Demonstratorbauteile wurden produziert - In Bezug zu AP 2.5.7 wurde überprüft ob und in welchem Maße Fehler im Prozess auftreten - Es wurden Vorversuche (einfache Probengeometrien) und Offlineanalysen durchgeführt (Output) 	
AP7 Bewertung der Bauteilqualität	<ul style="list-style-type: none"> - Es wurde eine quantitative Bewertung der neuartigen In-Situ-QS durchgeführt 	

	- Die Analyse und Auswertung der Demonstratorbauteile wurde abgeschlossen	
AP8 Optimierung der Qualitätssicherung	Ein optimiertes QS-System für den AM-Prozess wurde konzipiert und z.T. umgesetzt	Das Konzept für ein optimiertes QS-System liefert eine faktenbasierte Roadmap für zukünftige Forschungsprojekte.

Die erzielten Ergebnisse sind in mehrere laufende Lehrveranstaltungen an der Technischen Universität Hamburg eingeflossen:

- Six-Sigma-Methodik im Qualitätsmanagement
- Vorlesung Lasersystem- und –prozesstechnik
- Vorlesung Schweißtechnik
- Vorlesung Rapid Production

2.5 Bekannter Fortschritt bei anderen Stellen

Aktuelle, während der Laufzeit bekannt gewordene Erkenntnisse Dritter sind jeweils themenbezogen in die Entwicklungen eingeflossen. Es sind während der Laufzeit des Projektes keine Fortschritte bekannt geworden, die eine Änderung des Arbeitsplanes notwendig gemacht haben.

2.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichung der Ergebnisse

Erfolgte Veröffentlichung:

- Girela, A., Grottker, S., Tarhini, H., Emmelmann, C. "In-Situ Quality Assurance of Surface Roughness Using an On-axis Photodiode", Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference DDMC 2020, Berlin, 2020