GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

InSensa – In-Prozess-Sensorik und adaptive Regelungssysteme für die additive Fertigung

Gemeinsamer Abschlussbericht

InSensa-Konsortium

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Programm „Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen“ gefördert (02P15B070) und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut.
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

Impressum

2021, Gemeinsamer Schlussbericht der Projektpartner

Alle Rechte vorbehalten.

Felix Pastors (Aconity GmbH)
Volker Renken* (BIMAQ, Universität Bremen)
Michael Sorg (BIMAQ, Universität Bremen)
Marcel Moze (C.F.K. CNC-Fertigungstechnik Kriftel GmbH)
Juan Miguel Diaz del Castillo* (Fraunhofer IAPT)
Jan Lukas Augustin* (Fraunhofer IAPT)
Tim Hartter (ISRA Vision AG)
André Draeger (ISRA VISION Polymetric GmbH)
Guido Kleimenhagen (Optris GmbH)
Markus Kogel-Hollacher (Precitec GmbH & Co. KG)
Jann Poppinga (Materialise GmbH)
Joschka zur Jacobsmühlen (Materialise GmbH)
** Zugehörigkeit der Autoren während der Projektlaufzeit*

Dieses Dokument ist in der Publikationsdatenbank der Fraunhofer-Gesellschaft
unter dem Bezeichner (DOI) *10.24406/IAPT-N-638449* gelistet,
online: https://doi.org/10.24406/iapt-n-638449

Zusammenfassung

Das Ziel des Forschungsvorhabens InSensa war die Erfassung und Vermeidung von Fehlern in der pulverbettbasierten additiven Fertigung von Metallbauteilen mittels Laser (PBF-LB/M) durch die Integration von Sensor- und Regelungstechnik.

Als Ausgangspunkt der Arbeiten wurde vom Konsortium ein Fehlerkatalog mit Definitionen der Prozessfehler, sowie der möglichen Detektierbarkeit durch verschiedene Sensormodalitäten zusammengestellt. Basierend auf den Erfahrungen der AM-Anwender wurden die Fehler priorisiert, um die schwerwiegenden und häufigen Fehler bei der Entwicklung bevorzugt zu berücksichtigen. Zusätzlich wurden Demonstratorbauteile und -prozesse entworfen, um die ausgewählten Fehlerbilder gezielt zu provozieren.

Die Positionierung der Sensoren erfolgte sowohl koaxial („on-axis“), zur unmittelbaren Beobachtung des Schmelzbads, als auch „off-axis“ zur Überwachung ganzer Bauteile/Bauteilregionen und der Prüfung der aktuellen Schicht nach dem Aufschmelzvorgang. Zur Schmelzbadüberwachung wurde ein neues Hochgeschwindigkeits-Pyrometer mit einer Messfrequenz von 100 kHz entwickelt, eine Thermographie-Kamera prozessspezifisch angepasst und ein OCT-Topographiesensor mit neuer Wellenlänge zur Optimierung der Abbildungseigenschaften in PBF-LB/M-Anlagen entwickelt. Für die Überwachung von Bauteilregionen/ganzen Schichten wurde ein 3D-Kamerasystem (Multiview-Stereo) auf vier Kameras erweitert und angepasst, um auch glänzend reflektierende Oberflächen dreidimensional zu erfassen.

Die Integration der Sensoren in die verwendeten Versuchsanlagen wurde erfolgreich abgeschlossen, das 3D-Kamerasystem konnte aufgrund von Produktionsverzögerungen nur prototypisch erprobt werden. Hierbei konnten erfolgreich mehrere koaxiale Sensoren kombiniert werden und so eine multimodale Prozessüberwachung realisiert werden. Basierend auf der Auswertung von Bauprozessen mit provozierten Prozessfehlern wurde in mehreren Runden eine umfassende Bewertung der Sensormodalitäten erstellt, die sowohl das Potential als auch die Schwierigkeiten des Sensoreinsatzes zusammenfasst.

Ein Datenbanksystem zur Dokumentation der Daten aus der Bauvorbereitung und der Prozessüberwachung sowie der nachträglichen Analyse aufgetretener Fehler wurde spezifiziert und prototypisch umgesetzt. Die gesammelten Messdaten für provozierte Prozessfehler wurden genutzt, um Ansätze zur automatischen Fehlerdetektion zu evaluieren.

Nach erfolgreicher Integration der koaxialen Sensoren wurde die Echtzeit-Prozessregelung der Laserleistung basierend auf dem Messwert des Pyrometers angebunden und die Verzögerung des Regelungssystems untersucht. Es erreicht eine Regelzeit von 50 µs und ist somit für in der Praxis übliche Scangeschwindigkeiten in der Größenordnung von 1000 mm/s geeignet. Nach ersten Funktionstests mit niedrigen Scangeschwindigkeiten wurde der Einfluss der Regelung auf die Bauteilqualität, insbesondere im Bereich von Überhangregionen untersucht. Hierbei wurde gezeigt, dass bei Einsatz eines PI-Reglers die gemittelte Oberflächenrauheit von Brückengeometrien um 20 % reduziert wird.

Das Projektkonsortium konnte die angestrebten Entwicklungen (neue Sensorsysteme und Prozessregelung) erfolgreich abschließen und eine Bewertung des Zusatznutzens erarbeiten. Eine automatische Fehlerdetektion konnte nicht entwickelt werden, aber die Vorarbeiten und Prioritäten für eine zukünftige Bearbeitung wurden geschaffen

Inhaltsverzeichnis

1 EINLEITUNG 1

1.1. ZIELSETZUNG 1
1.2. STAND DER TECHNIK 1
1.2.1 Qualitätssicherung 2
1.2.2 Pre-Prozess-QS 3
1.2.3 Online Prozessüberwachung 3
1.2.4 Off-Axis-Schmelzbadüberwachung 5
1.2.5 Pulverbettüberwachung 5
1.2.6 Systemüberwachung 6
1.2.7 Post-Prozess-QS 6
1.2.8 Regelungstechnik 6
1.2.9 Simulationsmodelle 7
1.2.10 Zusammenfassung 8

2 ERGEBNISSE 9

2.1. FEHLERKATALOG 9
2.2. SENSORIK 14
2.2.1 Geplanter Aufbau 14
2.2.2 Hochgeschwindigkeits-Pyrometer 15
2.2.3 Thermografie-Kamera 18
2.2.4 3D-Kamera 20
2.2.5 OCT-Topographiesensor 24
2.2.6 Bewertung der Sensoren 27
2.3. PROZESSÜBERWACHUNG 29
2.3.1 Provokation von Prozessfehlern 29
2.3.2 Integration einer Regelhardware in eine SLM-Anlage 40
2.3.3 Sensorintegration 40
2.3.4 Ansätze zur Fehlerdetektion 42
2.4. REGELUNG 51
2.4.1 Aufbau 51
2.4.2 Integration 54
2.4.3 Rückkopplung der Messergebnisse auf Produktentstehungsprozess 56
2.5. JOB- UND DEFEKT-DATENBANK 57
2.5.1 Prozessmodellierung 57
2.5.2 Implementierung 58

3 AUSBLICK 60

4 ZUSAMMENFASSUNG 61

5 ANHANG 63

5.1. VERÖFFENTLICHUNGEN 63
5.2. REFERENZEN 63

1 Einleitung

1.1. Zielsetzung

Das Ziel des Verbundprojektes InSensa ist die Erfassung und Vermeidung von Fehlern in der pulverbettbasierten additiven Fertigung von Metallbauteilen durch die Integration von Sensor- und Regelungstechnik. Zur Fehlererkennung sollen geeignete Sensoren wie Strahlungssensoren, Topografiesensoren sowie Kamerasysteme für den sichtbaren und nichtsichtbaren Infrarot-Bereich entwickelt und in eine Maschine integriert werden. Anhand eines zu Projektbeginn aufgestellten Fehlerkatalogs, werden Softwarealgorithmen zur Messdatenauswertung entwickelt, die Prozessfehler eindeutig identifizieren und bewerten.

1.2. Stand der Technik

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 [Emm11a, Emm11b, Emm13].

a) b) c)

Abbildung 1-1 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 rostfreie CrNi-Stähle, Kobalt-Chrom-Legierungen, Nickel-Basislegierungen sowie einige Keramiken [Kru05], [Gib10]. In Abbildung 1-2 ist die schematische Funktionsweise des ALM-Verfahren dargestellt.

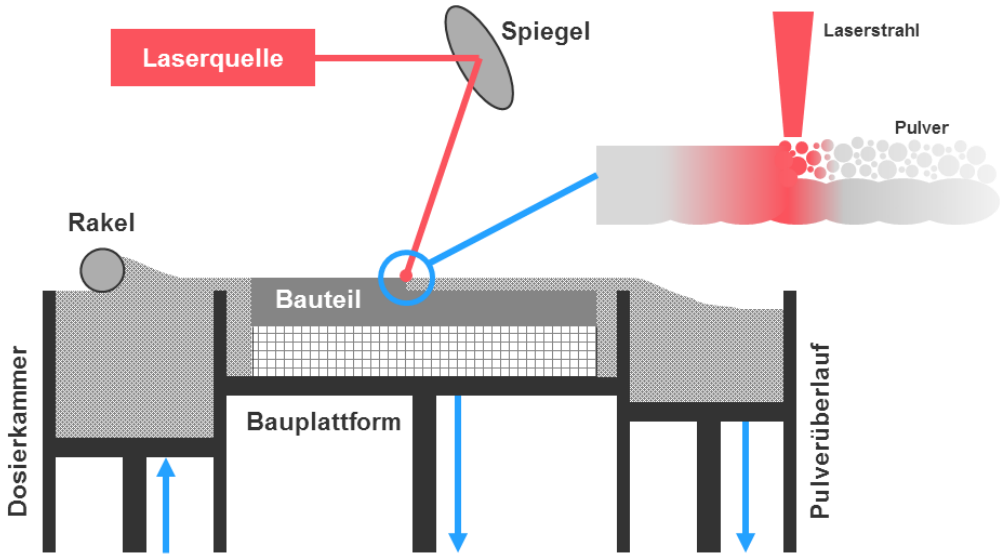


Abbildung 1-2 - Schematische Darstellung des ALM-Prozesses: In einem zyklischen Prozess wird Pulver in definierter Schichtdicke aufgetragen, mit einem Laser ortsselektiv aufgeschmolzen und die Bauplattform um eine Schichtdicke abgesenkt.

1.2.1 Qualitätssicherung

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 Unregelmäßigkeiten im Schmelzprozess, Fehlern beim Pulverauftrag und thermisch induziertem Verzug zuordnen. Abbildung 1-3 zeigt drei typische Bauteilfehler.

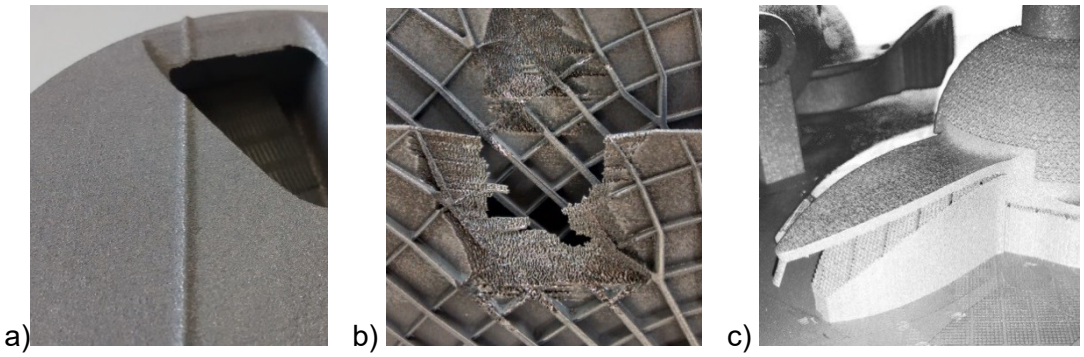


Abbildung 1-3 - Bauteildefekte im ALM Verfahren: a) Linienförmiger Versatz durch fehlerhaften Pulverauftrag, b) Aufbaufehler durch Pulvermangel und c) Verzug durch thermisch induzierte Spannungen und Versagen der Stützstruktur.

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 1-4 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]

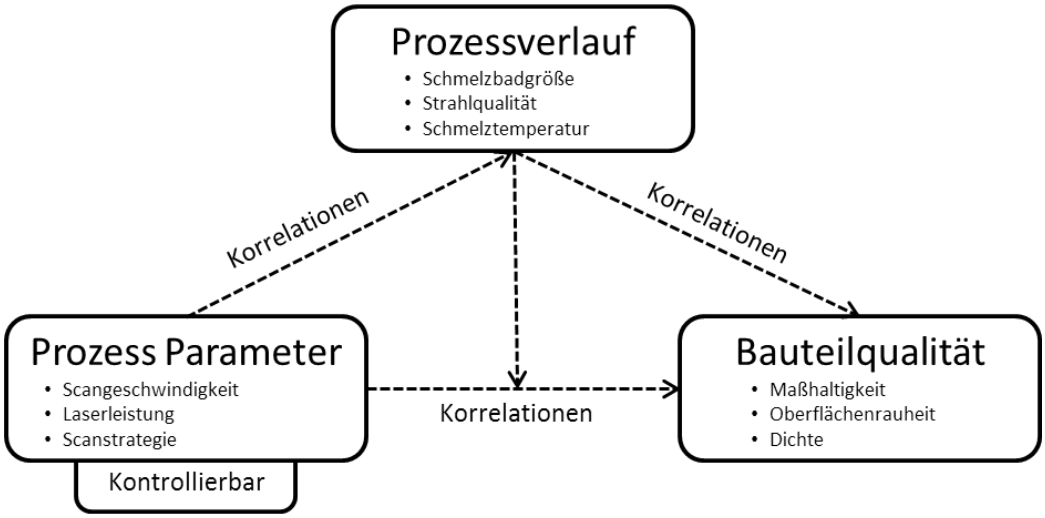


Abbildung 1-4 - Schematische Darstellung des Zusammenspiels von Prozessparametern, Prozessverlauf und Bauteilqualität (Quelle in Anlehnung an [Spe16])

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.

1.2.2 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 W/(M*K) lag. Wohingegen die Wärmeleitfähigkeit für Nickel in Festkörperform normalerweise auf 90.9 W/(M*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].

1.2.3 Online Prozessüberwachung

Einer der Hauptansatzpunkte 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 unstabilen Schmelzbädern kommen. Die Stabilität und Form des Bades kann während des Prozesses stark variieren [Kur12].

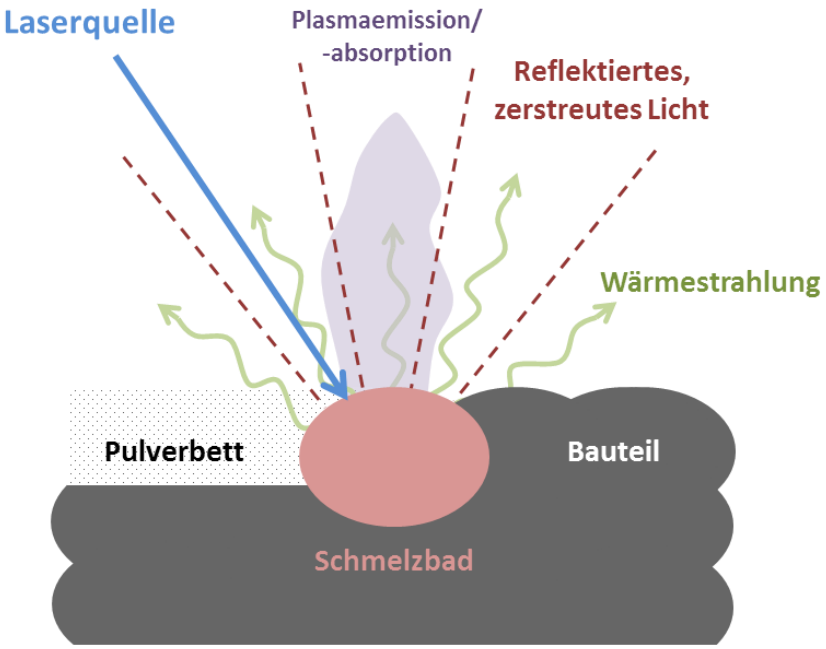


Abbildung 1-5 - Übersicht der elektromagnetischen Wellen während des ALM-Aufschmelzprozesses (Quelle in Anlehnung an [Spe16])

Um Aufschluss über den tatsächlichen Energieeintrag und die Schmelzbadeigenschaften zu erhalten, werden die elektromagnetischen Wellen (siehe Abbildung 1-5) 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 Strukturerfassung (sichtbarer Bereich) und solchen zur Temperaturerfassung (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 koaxialen Aufbau nutz der Sensor das gleiche optische System wie der Prozesslaser. Wie in Abbildung 1-6 am Beispiel des im Projekt zu entwickelnden Topografiesensors 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].

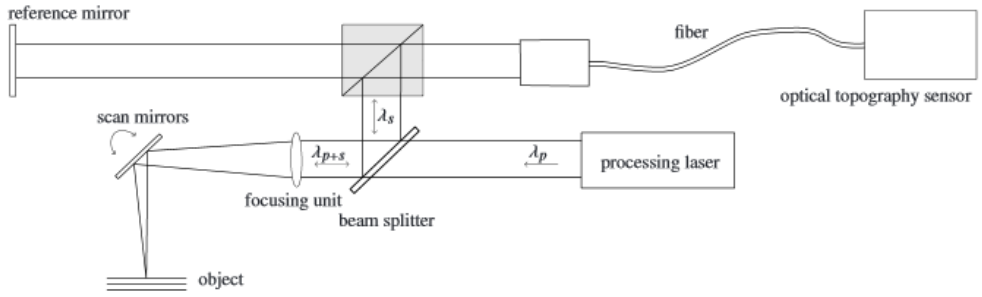


Abbildung 1-6 - Integration des Messstrahls in das Scannersystem der ALM-Anlage

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 Wellenlänge relative 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].

1.2.4 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].

1.2.5 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.

1.2.6 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].

1.2.7 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 Computer-Tomographie-Analyse zum Einsatz. Auf Grund der zum Teil sehr kleinen Fehlstellen in ALM-Bauteilen im Bereich von ≤ 10µm 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 Geometriekomplexität 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 Gut-Teil oder Ausschuss handelt [Lot11]. In der gängigen Praxis wird oftmals versucht mit Hilfe von sogenannten Dichtewürfeln, 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.

1.2.8 Regelungstechnik

Bei der Regelung von Qualitätsgrößen treffen die Fachgebiete der Systemtechnik und Qualitätswissenschaft zusammen. Um die Prozessleistung und -fähigkeit durch einen geschlossenen Regelkreis zu optimieren, stellt Pfeifer in [Pfe02] ein 4-Ebenen Qualitätsregelungskonzept für Fertigungsprozesse vor. Dieses Konzept erfordert Regelkreise auf verschiedenen Ebenen der Prozesskette: Das Kompensationspotential eines Teilprozesses kann über prozessinterne und prozessnahe Regelungen (lokal) gezielt eingesetzt werden. Eine prozessübergreifende Regelung ermöglicht es, die Wechselwirkungen zwischen Teilprozessen zu berücksichtigen.

Regelungen von Fertigungsprozessen auf der in-prozess Ebene gehören zum Stand der industriellen Technik. In der Mehrzahl der Anwendungen lassen sich mit linearen Reglern (klassischer Entwurf oder als Zustandsrückführung) gute Ergebnisse erreichen [Föl94]. Regelgrößen sind jedoch stets die Größen des Prozesses, z. B. Temperaturen in der Wärmebehandlung oder die Werkzeugposition in der spanenden Bearbeitung. In einer Prozesskette beeinflussen oft unterschiedliche Prozessparameter von mehreren Teilprozessen die Qualitätsmerkmale eines Werkstücks. Die Qualitätsgrößen selbst sind jedoch häufig nicht direkt messbar und müssen dann erst modellbasiert von den Messgrößen hergeleitet werden.

Auch in der Qualitätswissenschaft gibt es Verfahren, die für die Umsetzung einer Regelung in Frage kommen. So wurde eine Selbstoptimierungsmethode auch mit Hilfe der Integration von FMEA (Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse) und FTA (Fault Tree Analysis) für den

Bahnbetrieb im System „RailCab“ im Rahmen des SFB 614 entwickelt. Dieses System passt die Prioritäten von Zielkriterien, wie Komfort, Sicherheit, Energieeffizienz, Fahrzeit und Auslastung an [Gau13].

Weiterhin können intelligente Regelungskonzepte für Systeme mit mehreren Einflussgrößen mit Hilfe der Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) realisiert werden. Die Anwendung von KI-Methoden ist im wissenschaftlichen Umfeld weit verbreitet. Beispielsweise verwendet [Dör07] neuronale Netze zur Qualitätsregelung von thermischen Spritzprozessen. Jedoch gelingt der Transfer in die Industrie oftmals nicht. In speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS), die im industriellen Anwendungsumfeld häufig für Regelungsaufgaben eingesetzt werden, gibt es zwar intelligente Fuzzy-Bausteine, jedoch besteht für die Anwendung der betrachteten Methoden weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf [Kro08].

Im Kern der Qualitätsregelung steht ein sogenanntes Metamodell, das eine Näherung der Zusammenhänge zwischen Ein- und Ausgangsgrößen des Prozesses beinhaltet. Diese Metamodelle können sowohl mit experimentellen Daten als auch mit Daten aus FEM-Simulationen oder physikalisch exakten Modellen erstellt werden. Anhand der multiplen linearen Regression wird ein Metamodell, basierend auf Daten aus einem FE-Modell, für die Regelung eines zweistufigen Biegeprozesses in [Dal14] vorgestellt. Metamodelle können auch in Form von künstlich neuronalen Netzen oder Fuzzy Sets implementiert werden. In [Hav13] wird ein RBF-Modell mit einem Kriging-Modell für einen Bandbiegeprozess verglichen. Im Rahmen des Exzellenzclusters „Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer“ wurde der Laserabtragprozess als Blackbox betrachtet und mit RBF-Verfahren modelliert [Sch15].

Der ALM-Prozess stellt besondere Herausforderungen an die Regelungstechnik, eine echtzeitfähige Regelung im geschlossenen Kreis zu erreichen, ist das große Ziel. Aktuell werden die Bauteile post-prozess analysiert, um Vorhersagemodelle zu erzeugen, die auf die Prozessparameter einwirken [Spe16]. In [Nas15] wurde ein einfacher pyrometerbasierter Regelungsalgorithmus realisiert, der auf einer Schwellwertabschaltung bei Überschreiten einer Grenztemperatur basiert. Dies führt dazu, dass der Prozess länger dauert, aber die Gleichförmigkeit des Bauteils und Materialeigenschaften wie Härte verbessert wurden. [Mir15] setzte eine automatisierte Regelung auf Basis einer Infrarot-Kamera für EBM (electron beam melting) um.

Dort wird durch Bilderkennung auf die Porosität geschlossen, es sind aber noch umfangreiche Arbeiten erforderlich, um automatische Parameteränderungen zu realisieren und auch auf die Korngrößen im Material zu schließen. Auch wenn bereits viele Projekte unterschiedliche Sensortypen in die Anlagen integriert haben, so gibt es generell immer noch Defizite beim Prozessverständnis und bei der Entwicklung geeigneter Sensorik [Eve16].

1.2.9 Simulationsmodelle

Es gibt eine große Anzahl unterschiedlicher Simulationsmodelle, mit denen eine Reihe von physikalischen Aspekten des Schmelzvorgangs im ALM-Prozess untersucht und verstanden werden kann. Je nachdem welche Effekte betrachtet werden sollen, variieren Ansatz und Komplexität der Modelle. Simulationen zum Schmelzvorgang können in zwei Kategorien unterteilt werden: Detailmodelle, die das Pulver im Detail mit einzelnen Pulverpartikeln modellieren [Gür13], [Day14], [Kör11] und Globalmodelle, die das Pulver als ein homogenisiertes Kontinuum betrachten. Dies trifft typischerweise auf Simulationen zu, die auf der Methode der Finiten Elemente (FEM) basieren [Chi04], [Chi05], [Hod14], [Gus07], [Geb12], [Bra11], [Pal14], [Xu14].

In [Day14] wurde das Pulverbett mittels einer Verteilung kugelförmiger Pulverpartikel dargestellt und per Ray-Tracing Algorithmen die thermische Ausbreitung zwischen Pulverpartikeln durch Strahlung modelliert. Zudem wurde ihr Verhalten beim Abfahren eines Scanvektors untersucht. Auch in [Gür13] wurde ein Pulverbett aus einzelnen Partikeln modelliert. Hier

wurden für kleine Systeme fluiddynamische Simulationen durchgeführt, um auch das Aufschmelzen von Pulver zu berücksichtigen und Anbindungsphänomene zu untersuchen. Für den Wärmetransport wurde die Wärmeleitungsgleichung implementiert. In [Kör11] konnten in einer 2D-Betrachtung eine Reihe weiterer physikalischer Einflüsse, wie Oberflächenspannung und Gravitation, mitbetrachtet werden. So konnten u.a. Balling-Effekte und Mechanismen zur Ausbildung von Poren qualitativ untersucht werden.

Die thermischen FEM-Simulationen abstrahieren bei der Pulvermodellierung. Anstatt die sehr rechenintensiven Interaktionen einzelner Pulverpartikel zu betrachten, wird das Pulver als ein Kontinuum mit effektiven Materialeigenschaften, zu denen die thermische Leitfähigkeit des Pulvers gehört, betrachtet. Die Wärmeleitungsgleichungen sind die zugrundeliegenden Gleichungen. Der Übergang von Pulver zu Feststoff wird entweder durch einen diskreten irreversiblen Phasenübergang bei Überschreitung der Schmelztemperatur [Gus07], [Geb12], [Bra11], [Pal14], [Zäh10] oder durch einen temperaturabhängigen kontinuierlichen Phasenübergang [Chi04], [Chi05], [Hod14] dargestellt. Je nach Phase werden die thermischen Eigenschaften angepasst. Als Wärmequellen können Volumenquellen, z.B. Goldak-Quellen [Bra11], [Xu14] oder spezielle auf den Prozess angepasste Verteilungen [Hod14], [Gus07] verwendet werden. Auch Punkt- oder Linienquellen [Chi04], [Chi05], [Pal14] sind üblich.

Gute Übereinstimmungen mit Experimenten konnten insbesondere in den Schmelzbadabmessungen beobachtet werden. Diese sind an einzelnen Spuren zu verschiedenen Scanparametern untersucht worden [Chi05], [Gus07], [Pal14]. Die Modellannahme des homogenisierten Pulvermaterials ist somit eine valide Methode, um die experimentell schwer fassbare Schmelzbadform während des Prozesses zu analysieren.

Einer der wenigen Ansätze, der einen Schritt weiter geht und die simulativ ermittelte Schmelzbad- und Temperaturentwicklung in Korrelation mit Qualitätsmerkmalen der Schmelzspur bringt, ist in der Arbeit von Child [Chi05] beschrieben. Dort wurden zunächst im Parameterraum (Laserleistung, Scangeschwindigkeit) experimentell Bereiche bestimmt, in denen Parameterkombinationen zu jeweils ähnlichen Schmelzspurformationen/-qualitäten führen. Mit Parametersätzen, die auf der Grenzlinie zwischen dem Bereich regulärer Schmelzspuren und diskontinuierlicher Schmelzspuren durch Balling-Effekte liegen, wurden Simulationen von Einzelspuren durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass das Verhältnis aus Länge und Breite bei regulären Schmelzbädern stets p betrug. Auch gewann man dort Hinweise darauf, dass die Temperaturgradienten an der Oberfläche der Schmelzbäder einen Einfluss auf die Querschnittsform (rund, platt) des Schmelzbades haben.

1.2.10 Zusammenfassung

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass mittels additiver Fertigung qualitativ hochwertige Teile gefertigt werden können; derzeitig eingesetzte Methoden und Systeme zur Qualitätssicherung allerdings nur eingeschränkt funktionieren. Manuelle, nachgelagerte Prüfungen erscheinen sehr aufwändig und unpraktisch. Eine automatisierte und intelligente Prozessregelung zur Sicherung der Bauteilqualität, welche noch während des Prozesses auf Unregelmäßigkeiten reagieren, Fehler zuverlässig detektieren und mit Erkenntnissen aus simulativen Ansätzen verknüpfen kann 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/-vermeidung.

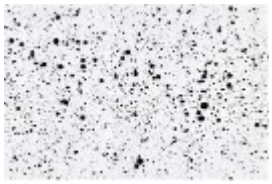
2 Ergebnisse

2.1. Fehlerkatalog

Um Prozessfehler eindeutig identifizieren und bewerten zu können ist es notwendig diese vorab zu definieren. Im Folgenden ist die Dokumentation definierter Fehlerursachen, -prozesse bzw. -bilder, die im Rahmen von InSensa berücksichtigt werden, aufgeführt.

Der Fehlerkatalog stellt dazu in der vorliegenden Form einen Katalog im Sinne der verwendeten Sensorik dar. Redundante Fehler und Folgefehler wurden vor diesem Hintergrund zur Verbesserung der Übersichtlichkeit zusammengefasst oder nicht explizit berücksichtigt. Kategorisierungen der Fehler leiten sich aus den Sensor- bzw. Detektionsprinzipien sowie den vorgeschlagenen Suchstrategien und Maßnahmenvorschlägen ab.

Turbulentes Schmelzbad / Porenbildung

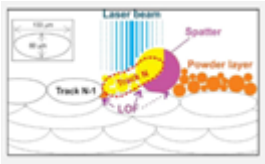


Poren resultieren aus dem Einschluss von Gas beim Erstarren einer turbulenten Schmelze: Ein zu hoher Energieeintrag, Verdampfung (Material oder Feuchtigkeit) sowie Schutzgas sind typische Fehlerursachen. Zudem können Schmelzspuren keine Anbindung finden bzw. geometrisch ungleichmäßig erstarren.

Sphärische Poren sind das Ergebnis.

Auswirkungen		Oberflächenqualität
	Dichte	mechanische Eigenschaften
	Eigenspannungen	
Merkmal(e)	• > 60 µm in jede Richtung (Poren)	
Sensoren	Topografie	Pyrometrie HS-IR-Kamera VIS-Kamera
Detektion	• Höhenprofil des Schmelzbades auswerten • Höhenprofil der erstarrten Oberfläche auswerten	
Maßnahmenvorschlag	• Nachbelichtung • Leistung variieren • Scangeschwindigkeit variieren • Erfassung von Größe und Position	
Priorisierung	7,5 / 10 (hoch priorisiert)	

Verunreinigung des Pulverbetts



Die Kontamination des Pulvers kann während der Herstellung, der Lagerung, dem Handling oder im Prozess erfolgen. Problematisch sind Fremdpartikel oder Spritzer, die in noch unbelichteten Bereichen des Pulverbetts vorliegen. Spratzige Poren im Bauteil sind das Ergebnis.

Auswirkungen

Maßhaltigkeit Oberflächenqualität

Dichte mechanische Eigenschaften

Eigenspannungen

Merkmal(e)

Nach dem Umschmelzen:

- Spratzige Poren mit > 100 µm in maximaler Ausdehnungsrichtung
- sonst > 15 µm

Im Pulverbett:

- 10 µm Durchmesser für Oxidpartikel (durch Metalldampfoxidation)
- > 100 µm im Durchmesser für Spitzer
- 20 µm für Fremdpartikel in minimaler Ausdehnungsrichtung, bis zu mehrere mm in maximaler Ausdehnungsrichtung

Sensoren

Topografie Pyrometrie HS-IR-Kamera VIS-Kamera

Detektion

- Fremdkörper durch geeignete Belichtungsstrategie sichtbar machen (für Kamera)
- Validierung der Kameradetektion oder stichprobenartige Kontrolle mittels Topografie

Maßnahmenvorschlag

- Neubeschichtung
- Nachbelichtung

Priorisierung

5,1 / 10 (sehr niedrig priorisiert)

Bauteilverzug und Rissbildung

Eigenspannungen führen zu einem Verzug des Bauteils und gebrochene Stützen verschlimmern das Problem zusätzlich.

Risse entstehen aufgrund von Eigenspannungen.

Auswirkungen	Maßhaltigkeit	Oberflächenqualität
	Dichte	mechanische Eigenschaften
	Eigenspannungen	

Merkmal(e)

- Überhitzung führt zu starken Temperaturgradienten (und Eigenspannungen), insb. für feine Strukturen
- Hochziehen von Bauteilen um mehr als die Schichtdicke (> 30 µm)

Sensoren	Topografie	Pyrometrie	HS-IR-Kamera	VIS-Kamera

Detektion

- Temperaturverteilung auf der Oberfläche detektieren (heat map)
- Änderung der Schmelzbaddimension
- (Ab-)Risse im Prozess via Topografie suchen bzw. Höhenunterschied zu Referenz (Pulverbett) suchen

Maßnahmenvorschlag

- Leistung anpassen
- Volumenenergiedichte anpassen
- Belichtungsstrategie anpassen

Priorisierung 9,3 / 10 (sehr hoch priorisiert)

Wärmestau

Wärmestaus im Pulverbett bzw. Bauteil führen zu einer Beeinflussung der Mikrostruktur sowie dem Auftreten von Anlauffarbe. Gründe sind die enge Anordnung von Bauteilen sowie das Fehlen von notwendigen Stützen. Im Fall des Anlaufens ist zudem ein zu hoher Sauerstoffgehalt ausschlaggebend.

Auswirkungen	Maßhaltigkeit	Oberflächenqualität
	Dichte	mechanische Eigenschaften
	Eigenspannungen	

Merkmal(e)

- Überhitzen einzelner Bauteil- oder Pulverbettregionen

Sensoren	Topografie	Pyrometrie	HS-IR-Kamera	VIS-Kamera

Detektion

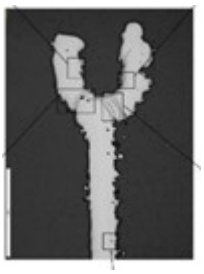
- Heat Map gegen Referenz (homogene Temperatur) abgleichen

Maßnahmenvorschlag

- Warten vor Folgebelichtung
- Leistungsanpassung

Priorisierung 5,7 / 10 (niedrig priorisiert)

Versatz im Bauteil (inkl. Y-Effekt)



Die Verformung von Bauteilen kann durch die Pulverauftragseinheit verursacht werden. Die Generierung von Y-Formen resultiert hingegen aus dünnen Wänden bei der Verwendung von hohen Leistungen (Oberflächenvergrößerung der Schmelze).

Zudem kann es passieren, dass das Optiksystem und die Bauplattform relativ zueinander bewegt werden.

Auswirkungen

Maßhaltigkeit | Oberflächenqualität | Dichte | mechanische Eigenschaften | Eigenspannungen

Merkmal(e)

- ~ 300 µm Wandungsdicke (X/Y-Richtung)
- Erhöhung der Schmelzspur um mehr als die Schichtdicke (> 30 µm)

Sensoren

Topografie | Pyrometrie | HS-IR-Kamera | VIS-Kamera

Detektion

- Schichtanalyse (nach Belichtung und Pulverauftrag)
- Referenzmarke / Referenzbauteil zur Kontrolle aufbauen

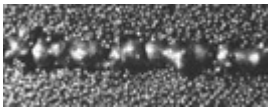
Maßnahmenvorschlag

- Abbruch / Pausierung
- zusätzlicher Plattformoffset bei Fahrten der Pulverauftragseinheit
- Laserleistung absenken

Priorisierung

5,7 / 10 (niedrig priorisiert)

Balling-Effekt



Das Schmelzbad teilt sich in mehrere Einzelsegmente. Diese können zylindrische bzw. kugelförmige Geometrien aufweisen. Ursache ist eine zu hohe oder zu geringe Energieeinkopplung.

Beschädigungen des Beschichters führen oftmals zu Folgefehlern.

Auswirkungen

Maßhaltigkeit | Oberflächenqualität

	Dichte	mechanische Eigenschaften
	Eigenspannungen	

Merkmal(e)

zylindrisch:

- < 500 µm in Scanrichtung
- ~ 60 µm quer zur Scanrichtung

kugelförmig:

- ~ 60 µm im Durchmesser

Sensoren Topografie Pyrometrie HS-IR-Kamera VIS-Kamera

Detektion

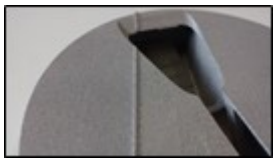
- nachträgliches Vermessen kritischer Bereiche (Stichproben)
- nachlaufende / rotierende Messung um das Schmelzbad

Maßnahmenvorschlag

- Nachbelichtung
- Leistungsanpassung

Priorisierung 7,6 / 10 (hoch priorisiert)

Beschichtungsfehler



Das Pulver wird ungleichmäßig aufgetragen.

Auswirkungen	Maßhaltigkeit	Oberflächenqualität
	Dichte	mechanische Eigenschaften
	Eigenspannungen	

Merkmal(e)

- in Auftragsrichtung: 100 µm bis „unendlich“
- quer zur Auftragsrichtung: 100 µm bis zu mehreren mm
- Tiefe: > 30 µm

Sensoren Topografie Pyrometrie HS-IR-Kamera VIS-Kamera

Detektion

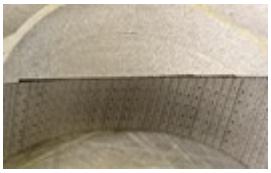
- Detektion über geeignete Belichtungsstrategie mittels Kamera
- Stichproben via Topografie

Maßnahmenvorschlag

- erneutes Beschichten
- Pausieren / Beschichterwechsel

	• Bauteile im kritischen Bereich aus dem Job nehmen
Priorisierung	6,9 / 10 (hoch priorisiert)

Schichtversatz



Das Pulverbett ist abgesunken oder Stützfehler treten auf. Ebenso ist eine Bauteilbewegung möglich.

Auswirkungen	Maßhaltigkeit	Oberflächenqualität
	Dichte	mechanische Eigenschaften
	Eigenspannungen	
Merkmal(e)	• Versatz des Pulverbetts: > 30 µm	
Sensoren	Topografie Pyrometrie HS-IR-Kamera VIS-Kamera	
Detektion	• Abbruchkante am Rand der Pulverplattform detektieren	
Maßnahmenvorschlag	• Korrekturfahrt der Plattform	
Priorisierung	6,0 / 10 (niedrig priorisiert)	

2.2. Sensorik

2.2.1 Geplanter Aufbau

Um die unterschiedlichen Sensormodalitäten gewinnbringend zur Prozessüberwachung und -regelung einzusetzen, wurde von den Projektpartnern vorab die Position der Systeme festgelegt. Hierbei gilt es die „on-axis“-Position, die koaxial durch den Strahlgang des Arbeitslaser immer die Region um die aktuelle Scannerposition vermisst, von der „off-axis“-Position zu unterscheiden, bei der die Messposition fixiert ist und so entweder eine Betrachtung des sich bewegenden Schmelzbads oder eine Messung der gesamten Arbeitsebene bzw. Ausschnitten hiervon erfolgt.

Die Zuordnung der Sensoren zu den Positionen ist in Abbildung 2-1 illustriert, neben der hier dargestellten Position der IR-Kamera als „off-axis“-System wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens auch eine Aufnahme im Strahlgang untersucht.

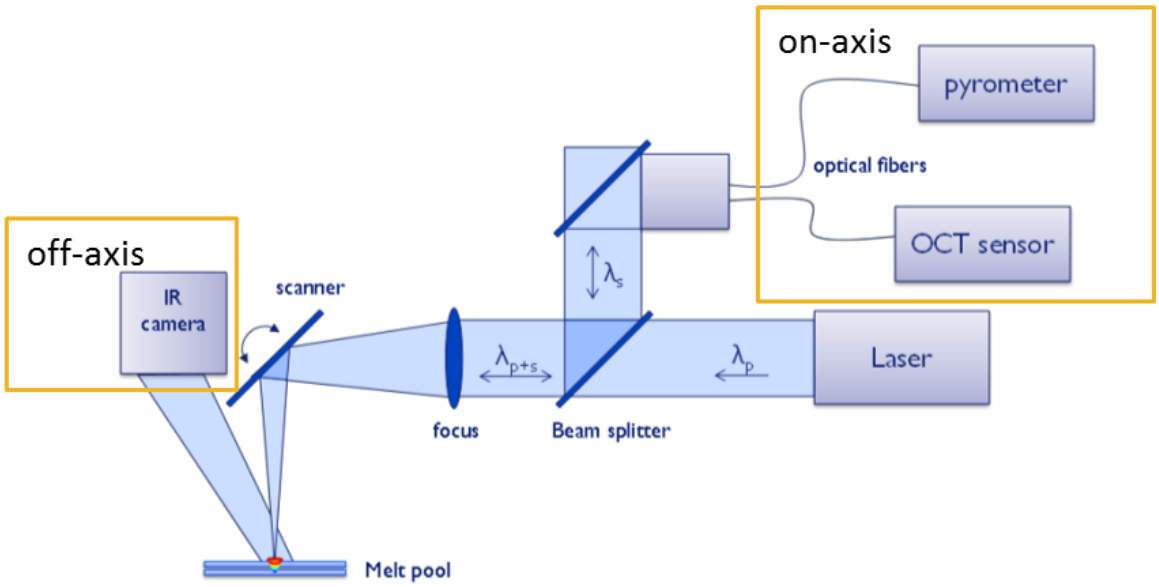


Abbildung 2-1 Geplante Position der Sensoren zur Prozessüberwachung: neben der Schmelzbadüberwachung (koaxial/on-axis) wird die Arbeitsebene auch off-axis aufgenommen. Neben der IR-Kamera soll hier auch das 3D-Kamerasystem platziert werden.

2.2.2 Hochgeschwindigkeits-Pyrometer

Der Fokus für die Entwicklung des Pyrometers lag darin die Zeitkonstante so niedrig wie möglich zu halten, um damit eine Zykluszeit von <50µs zu erreichen. Nur somit könnte das Signal für eine Echtzeitregelung genutzt werden. Solch kurze Zykluszeiten konnten in dem Projekt erstmalig umgesetzt werden.

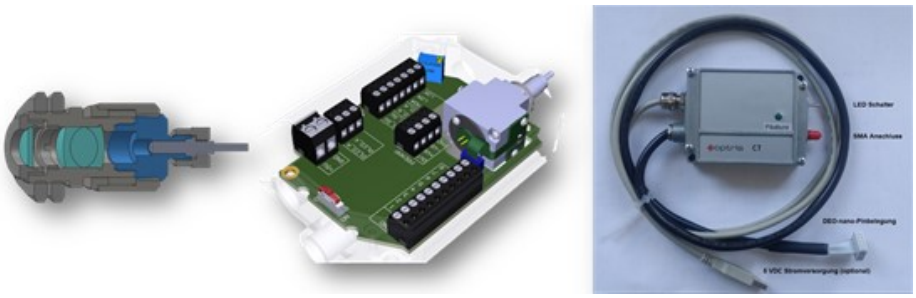


Abbildung 2-2 Messkopf, Platine mit Strahlteiler und Gerät mit Anschlüssen.

Der komplette Neuentwurf des Platinen Layout wurde in analoger Bauweise gehalten, um möglichst wenig Verarbeitungszeit zu verlieren und erste Tests zu ermöglichen. Der komplette Temperaturbereich von 900°C bis 1800°C wurde in 8 Verstärkerstufen aufgeteilt. Damit könnte je nach Objekttemperatur der Kanal mit der passenden Auflösung gewählt werden und auch kleinere Temperaturunterschiede sichtbar gemacht werden.

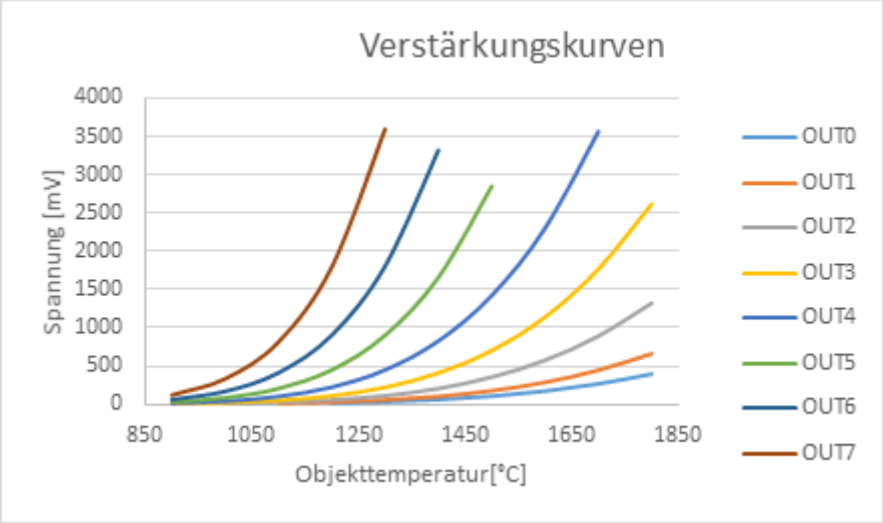


Abbildung 2-3 Verstärkungskurven des Pyrometers

Der optische Aufbau wurde mit einem Strahlenteiler und Lichtleitfaser realisiert. Zur besseren Fokussierung und Positionierung wurde im Strahlenteiler eine Pilot-LED installiert.

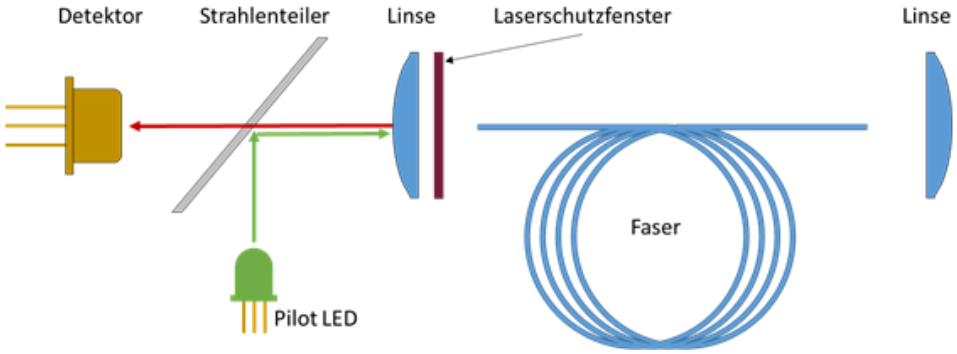


Abbildung 2-4 Schema optischer Aufbau des Pyrometers.

Um den Detektor nicht zu beschädigen, muss die Laserleistung durch den Einsatz eines Laserschutzfilters abgeschirmt werden. Um die Optimierung der optischen Komponenten der SLM Anlage zu nutzen bzw. den Messfehler gering zu halten ist es sinnvoll eine Messwellenlänge so nah wie möglich an der Laserwellenlänge zu wählen aber dennoch darf die Laserleistung nicht den Detektor treffen. Dies stellt damit eine hohe Anforderung an den Laserschutzfilter da und konnte mit einem Bandpass-Filter, welcher schmalbandig die Laserwellenlänge ausblendet und die spektrale Empfindlichkeit des Pyrometers bestimmt.

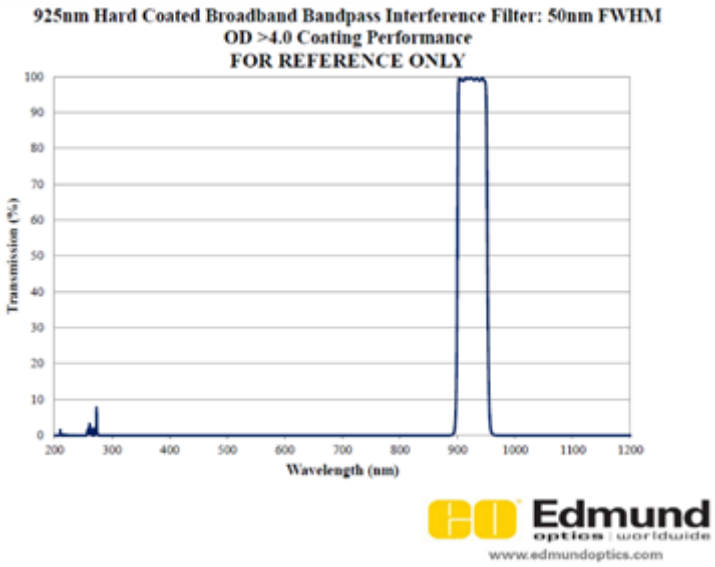


Abbildung 2-5 Transmission des Laserschutzfilters

Die Spannung zu Objekttemperaturkurven wurde vor einem PTB angebundenen Hochtemperaturstrahler kalibriert (siehe Abbildung 2).

Hinsichtlich des Hauptziels kurzer Zykluszeit (<50µs) wurde die Zeitkonstante ermittelt. Eine Messung ergab durch die Sprungantwort des kompletten Pyrometers eine Zykluszeit von ca. 10µs (90%) und damit als geeignet für die ersten Projektversuche.

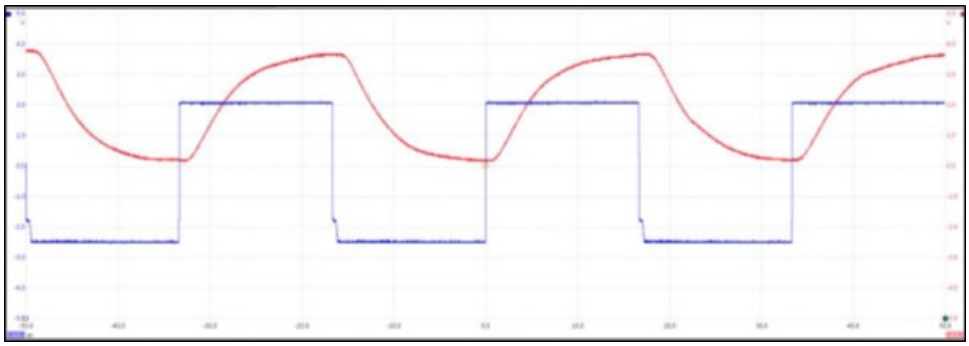


Abbildung 2-6 Messung Spannungszeit Diagramm Zykluszeit

2.2.2.1 Optimierung der Sensorik Pyrometer

Zur Weiterentwicklung der Sensoren aus dem AP2.6 (Softwareintegration und Optimierung der Sensorik) wurde der Einsatz einer Ratio-Variante des Pyrometers gearbeitet.

Durch Schmauch und Rauchentwicklung kann die thermografische Messung auch dauerhaft durch die Ablagerung am Laserschutzfenster zum Bauraum beeinflusst werden. Hier war der Ansatz mithilfe der Messung bei 2 verschiedenen Wellenlängen zu ein Signalverhältnis zu bilden. Ablagerungen sowie Schweißrauch sollten das Signal bei beiden Detektionswellenlängen gleichermaßen beeinflussen, somit würde das Verhältnis beider Detektionswellenlängen gleichbleiben bzw. nur von der Objekttemperatur abhängig sein und als Grundlage für eine stabilere Messung dienen.

Hierzu wurde ein Faserpyrometer mit einer Sandwichdiode aufgebaut deren Sensitivitätsmaxima bei verschieden Wellenlängen befinden.

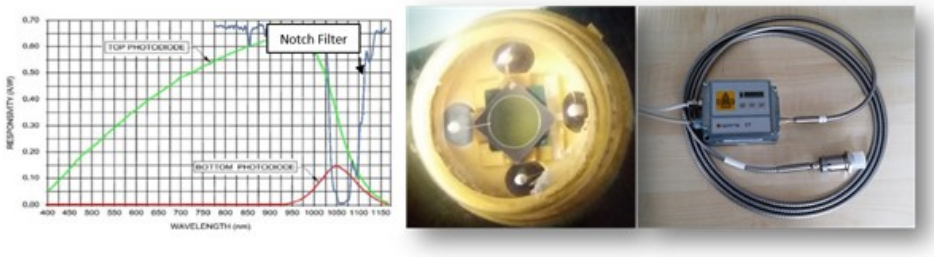


Abbildung 2-7 Detektionsspektrum mit Laserschutzfilter, Sandwichdiode und Ratio Faserpyrometer Demonstrator

Eine Einschränkung des Detektionsspektrum mit einem Notchfilter (CWL 1064) ist in dem Projektanwendungsfall nötig, um das Pyrometer vor dem Arbeitslaser zu schützen.

Bei der Kalibrierung des Demonstrators ist aufgefallen, dass das Signal der Bottom Diode bei gleichbleibender Strahlungsquelle stark verrauscht und Schwankungen bis zum Faktor 2 unterliegt. Die Temperaturberechnung aus dem Verhältnis unterlag damit Schwankungen bis zu mehreren 100K und für die Anwendung ungeeignet.

Es ist anzunehmen, dass die Blockung des Notchfilters einen zu großen Anteil des Detektionsbereichs der Bottom-Diode verringert. Im Zusammenhang der ohnehin schon verminderten Sensitivität (nur ca. 5%) der Bottom-Diode gegenüber der Top-Dioden können hier Effekte wie Detektorrauschen und Eigentemperaturdrift das Nutzsignal überschreiten und eine qualitative Messung unmöglich machen. Ein weiterer Aufwand wie die Nutzung anderer Detektionswellenlängen oder Änderung weiterer optischer Parameter konnte in diesem Projekt nicht mehr realisiert werden. Dennoch konnten die Versuche zu einer lasergeschützten Ratio Variante den Aufwand abschätzen und Schritte in die Weiterentwicklung dieser Variante für Optris attraktiv machen.

2.2.3 Thermografie-Kamera

Der Kamera Demonstrator für das Projekt wurde mit einem Chip bis zu 1µm Detektionswellenlänge aufgebaut. Um den Kameradetektor vor dem Bearbeitungslaser zu schützen, musste ein Laserschutzfenster mit einer Zentralwellenlänge (CWL) 880nm eingesetzt werden.

Abbildung 2-8 Projektkamera mit Laserschutzfenster

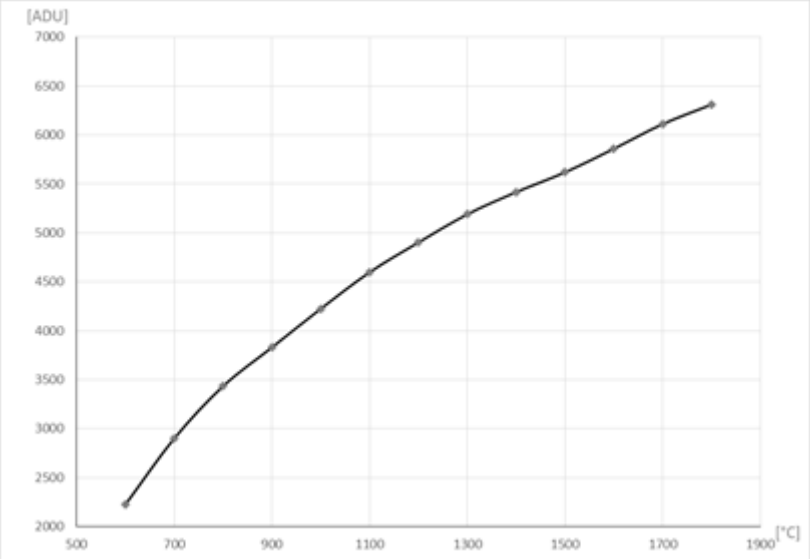


Abbildung 2-9 Temperatur zu ADU Kurve der Projektkamera.

Die Kalibrierung der Kamera stellte aufgrund des geringeren Signals eine gewisse Herausforderung dar. Besonders Effekte wie die Signaländerung aufgrund Änderung der Eigentemperatur mussten in längeren Heiz und Abkühlphasen im Klimaschrank berechnet werden. Durch die spektrale Eingrenzung mussten die Kalibrierroutinen angepasst werden und mehrfach gegen einen PTB angebundenen Hohlraumstrahler verifiziert werden. Die minimal auflösbare Temperatur von 600°C konnte dennoch erreicht werden. Für eine sinnvolle Implementation in der Versuchsanlage kann die Kamera im Teilbildmodus bis zu 1kHz betrieben werden.

2.2.3.1 Optimierung der Thermografie Kamera:

In den ersten Versuchen ist eine Kamera ausgefallen, wobei die Ursache ein defekter Detektor aufgrund zu geringerer Laserblockung war. Um die bessere Integrierbarkeit an der Projektanlage sowie die ausreichende Blockung des Arbeitslasers zu gewährleisten, wurde ein verbessertes Laserschutzfenster in die Chiphalterung in das Innenleben der Kamera integriert.

Dies hat auch optisch-messtechnisch Vorteile da störende Reflexionen des Filters gemindert werden. Die messbare Mindesttemperatur von 600°C bleibt weiterhin möglich.

Abbildung 2-10 Chipblende mit Laserschutzfenster.

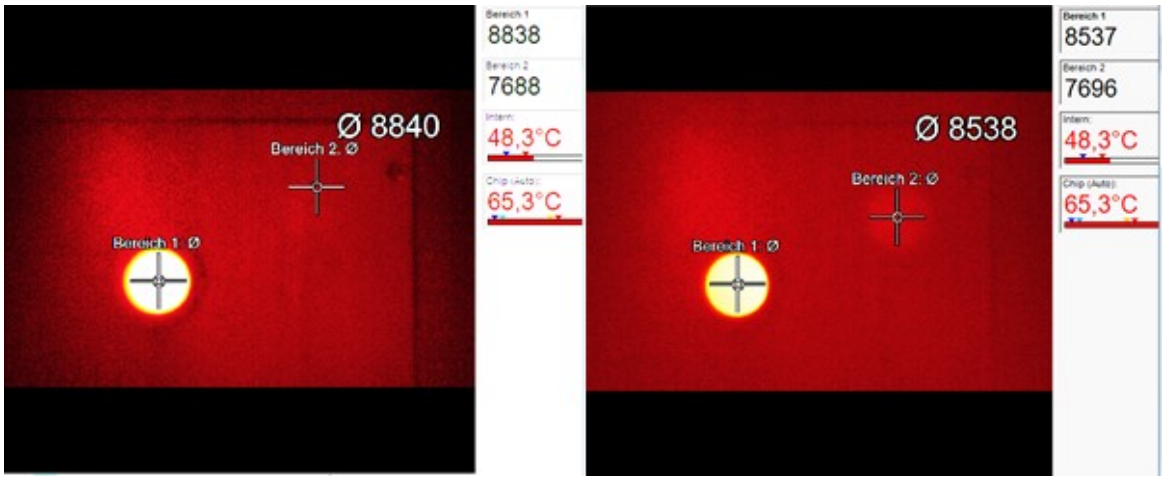


Abbildung 2-11 Veranschaulichung der Reflexionsminderung (rechts).

Die besseren Reflexionseigenschaften und günstigere Integrationsmöglichkeit des Filters könnten in weiteren Kamera Specials zur Anwendung kommen und stellen damit einen Mehrwert für die Optris GmbH dar.

2.2.4 3D-Kamera

Für die Detektion der zu Beginn des Projekts definierten Fehler wurde zunächst ein 3D Stereo-Sensor (mit zwei Kameras) konzipiert. Erste Tests auf gedruckten, metallischen Materialen, zeigten schnell, dass die erzeugten 3D Scans zu große Lücken in den Punktwolken aufwiesen und das Sensor-Konzept noch einmal überarbeitet werden musste.

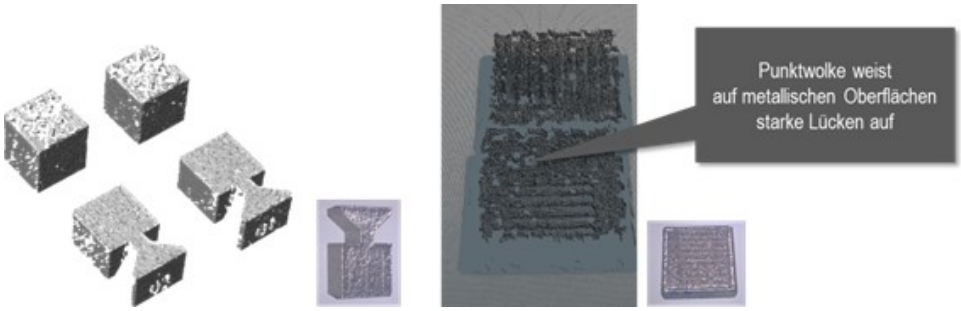


Abbildung 2-12 Erste Test-Scans eines Stereo-Scanners

2.2.4.1 Optimierung der 3D Sensorik

Das erweiterte Sensor-Konzept sieht einen 3D Sensor mit vier Kameras (Multi-View-Stereo) und einem speziellen Pattern-Projektor vor. Durch Nutzung von mehreren Kameras können Lücken im 3D Scan, die auf Metallischen Oberflächen hauptsächlich durch Reflektionen entstehen, größten Teils vermieden werden.

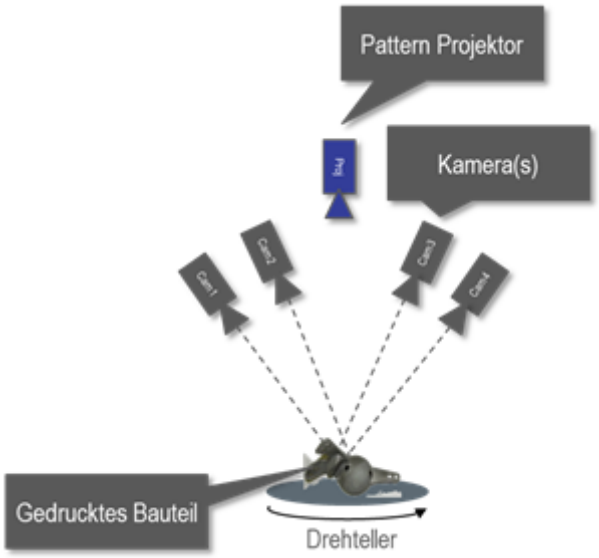


Abbildung 2-13 Multi-View-Stereo 3D Sensor – Schematische Darstellung

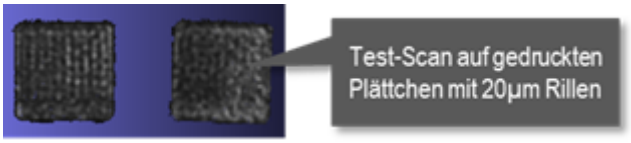


Abbildung 2-14 3D-Scan - Multi-View-Stereo

Grundsätzlich können alle definierten Fehler mit der Multi-View-Stereo Kameratechnik entdeckt werden. In den Tests konnten Fehler ab 20µm mit der 3D Sensorik detektiert werden.

Die Fehler der Typen a) „Linienförmiger Versatz durch fehlerhaften Pulverauftrag" und b) „Aufbaufehler durch Pulvermangel" müssen mit einem Sensor detektiert werden, der in den Bauraum des 3D-Druckers integriert ist oder zumindest in diesen hineinschauen kann „In-Prozess Kontrolle". Die Fehler des Typs c) „Verzug durch thermisch induzierte Spannungen und Versagen der Stützstruktur" können von einem separaten Sensor, in einem nachgelagerten Inspektionsschritt „Post-Prozess Kontrolle" erkannt werden. Hierfür kann ein zusätzlicher Drehteller angesteuert werden, um das Bauteil von allen Seiten zu prüfen.

2.2.4.2 Post-Prozess Kontrolle

Über einen Drehteller kann das Objekt aus verschiedenen Richtungen gescannt werden. Es wurde ein Algorithmus entwickelt, um Punktwolken zu filtern und gegeneinander in 3D zu registrieren, dies liefert einen vollständigen 3D Scan des gedruckten Bauteils.

Der 3D Scan des Bauteils kann mit einer CAD Datei abgeglichen werden. Über Schwellwerte können lokale und globale Grenzen für die Geometrie-Prüfung definiert werden, um Risse und Verformungen des Bauteils zu erkennen. Es können Abweichungen in der Größenordnung von 20µm detektiert werden.

Wegen Abschattung können tiefere Bohrungen (Löcher) nicht vermessen werden.

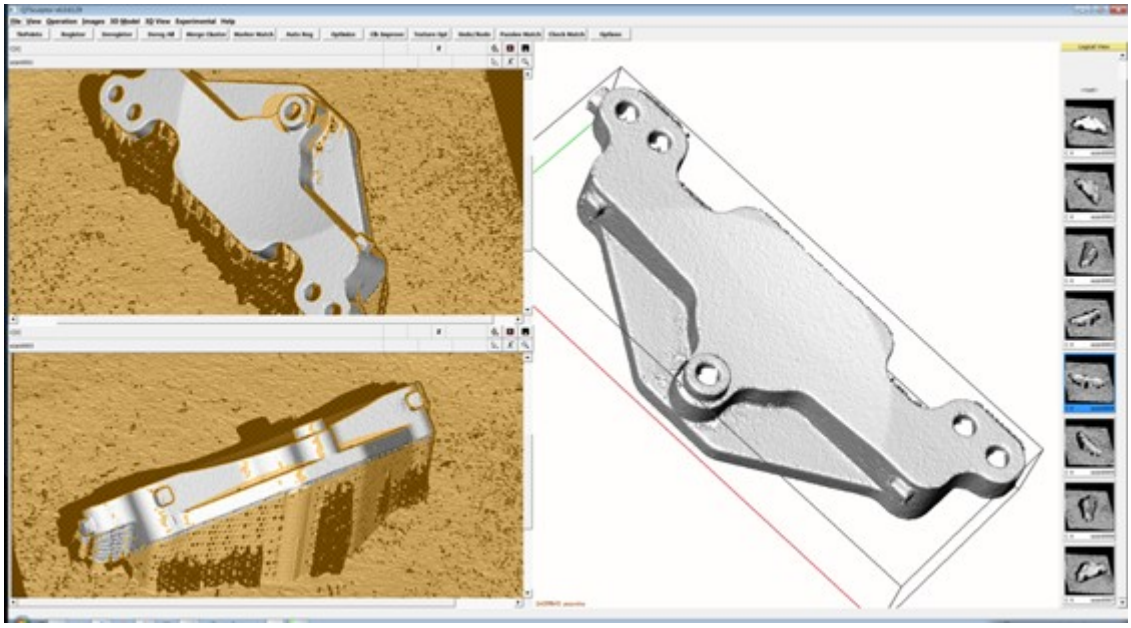


Abbildung 2-15 Registrierung von Einzel-Scans zu einem Bauteil-Scan

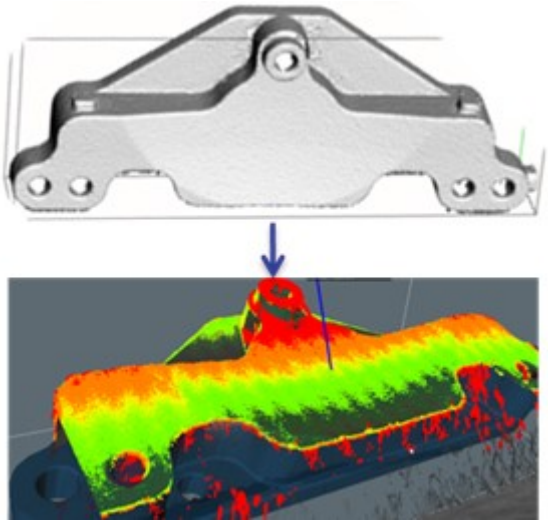


Abbildung 2-16 Heat-Map mit Abweichungs-Vektoren vom Sollwert

2.2.4.3 In-Prozess Kontrolle

Auch die In-Prozess Kontrolle scheint mit dem entwickelten Multi-View-Stereo Sensor möglich. Die Fertigstellung des Prototyps hat sich, aufgrund der COVID-19 Pandemie, aber so

stark verzögert, dass ein Einbau in den Bauraum des 3D Druckers nicht mehr stattfinden konnte.

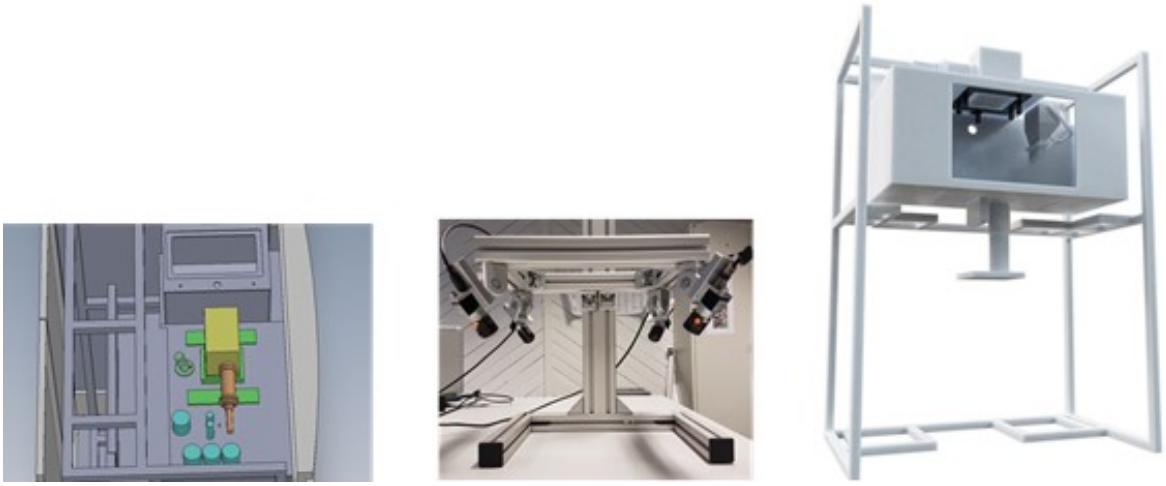


Abbildung 2-17 Konzept für die Integration des 3D Sensors in den Bauraum des 3D Druckers

Beim Projektpartner C.F.K. wurde in einem Workshop sowohl Machbarkeit geprüft, als auch die erreichbare Messgenauigkeit bestimmt. Fehler ab 20µm im Pulverbett können im Tiefenbild erfasst werden. Der Flächeninhalt und Tiefe von Kratzern und Löchern im Pulverbett kann in 3D vermessen werden. Eine Nutzung des Sensors zur In-Prozess Kontrolle scheint damit möglich.

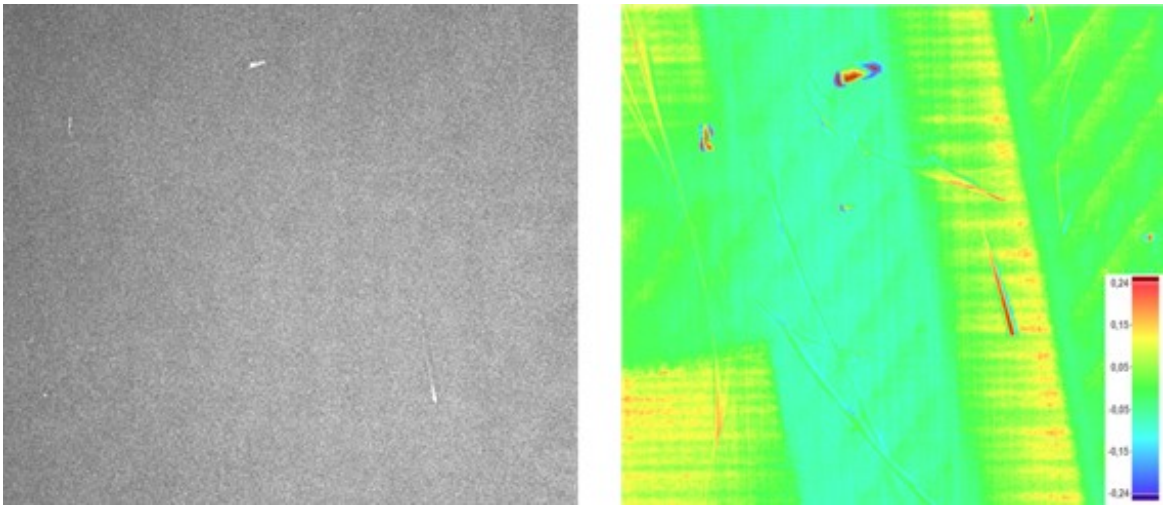


Abbildung 2-18 Pulverbett mit eingebrachten Fehlern (links), Tiefenkarte des 3D Scans als „Heat-Map“ (rechts)

Um festzustellen, ob Fehler in der Laser-Belichtung in 3D gemessen werden können, wurde der Belichtungs-Prozess in der Mitte einer Schicht angehalten. Die Fehlstellen sind im 3D Scan deutlich zu erkennen.

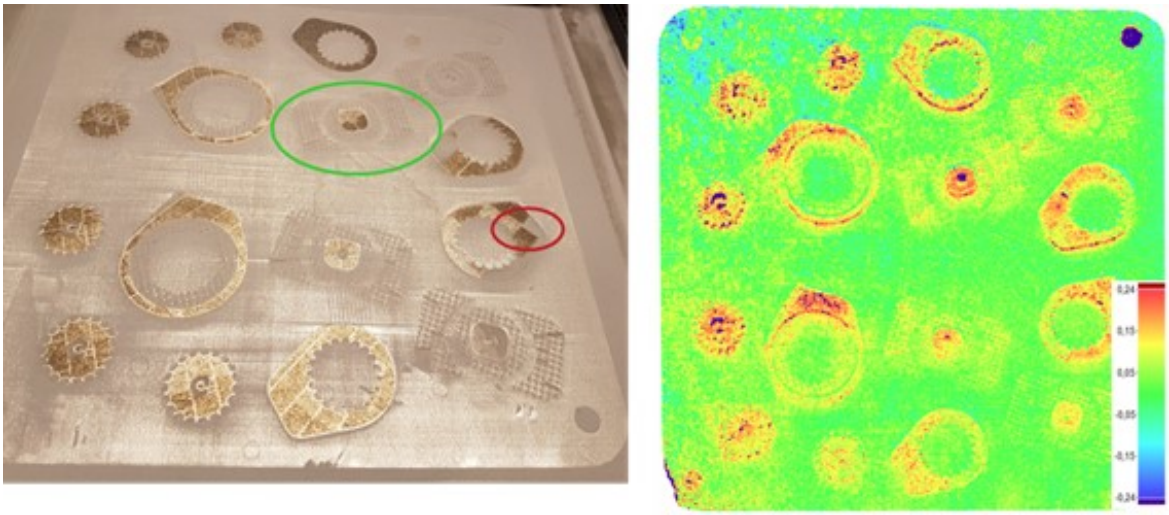


Abbildung 2-19 Abgebrochene Laser-Belichtung. Foto (links), 3D Scan als „Heat-Map“ (rechts)

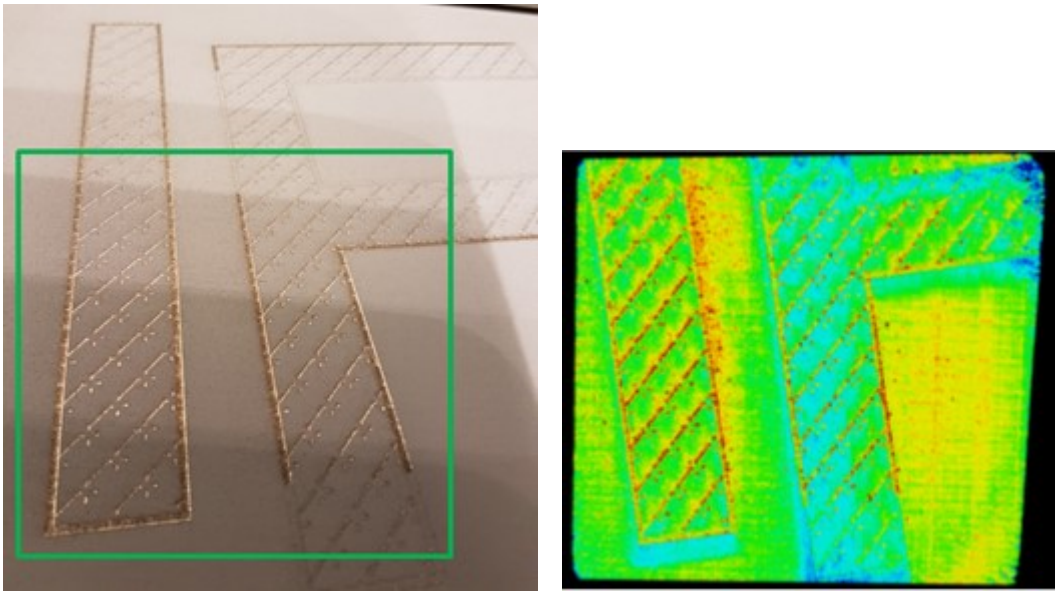


Abbildung 2-20 Abgebrochene Laser-Belichtung. Foto (links), 3D Scan als „Heat-Map“ (rechts)

Ergebnis: Der 3D Sensor kann Tiefen-Unterschiede in der Größenordnung von 20µm erfassen. Damit scheint eine In-Prozess Kontrolle via 3D Sensor machbar.

2.2.5 OCT-Topographiesensor

Die grundsätzliche Idee zu Projektstart war, die OCT Sensorik als dimensional messendes Verfahren in die PBF-LB Anlagen bei Aconity, Materialise und dem Fraunhofer IAPT einzubinden. Der kleinste gemeinsame Nenner im Rahmen der Überprüfung einer Machbarkeit war, den für das Messverfahren notwendige Referenzast als Freistrahl Konzept aufzubauen. Abbildung 2-21 zeigt eine Skizze dieses Ansatzes. Beispielhaft in Abbildung 2-22 die Integration in die Anlage bei Aconity.

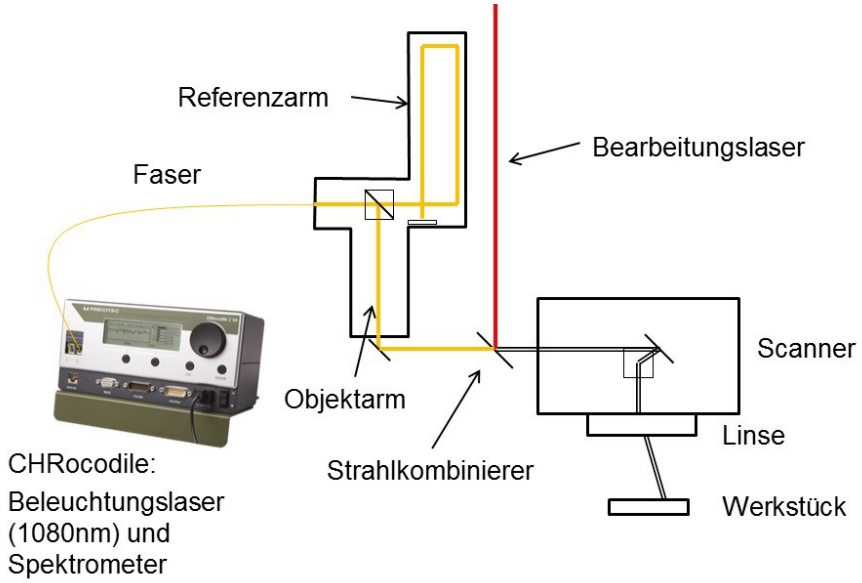


Abbildung 2-21 Skizze der Integration einer OCT Sensorik in eine PBF-LB Anlage

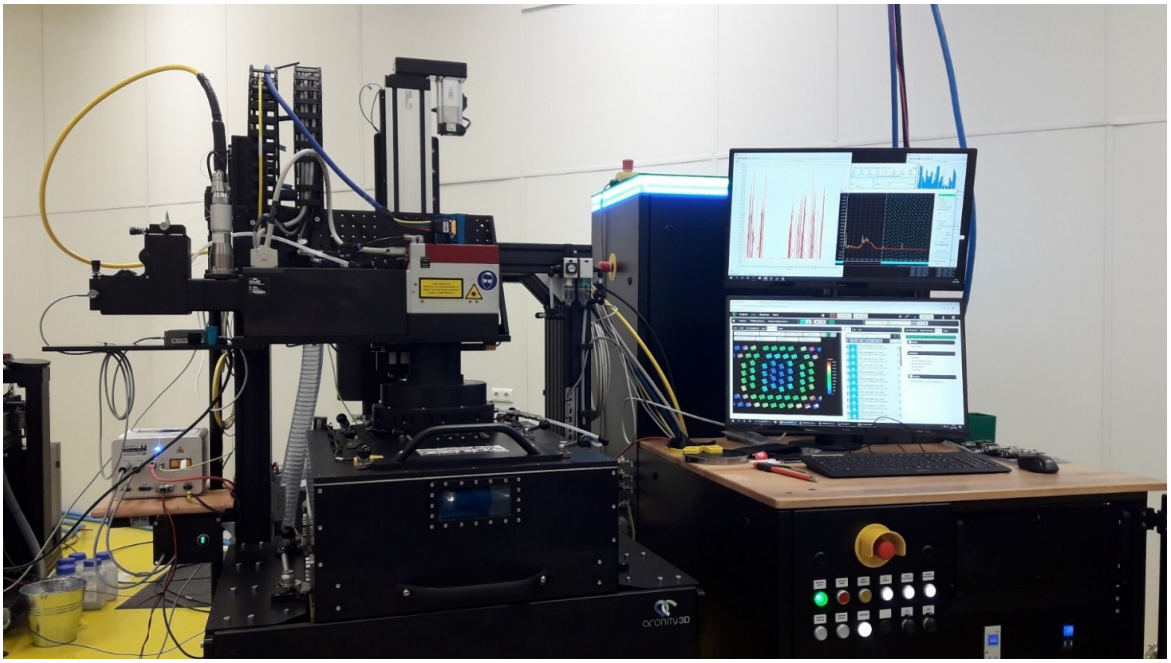


Abbildung 2-22 Gemeinsamer Strahlengang von Bearbeitungslaser und OCT Messlicht in der Anlage A-conity

So wie bei Aconity wurden auch Anlagen am Fraunhofer IAPT und bei Materialise mit der Sensorik ausgestattet. Ein wesentlicher Arbeitsschwerpunkt beim Einbau der Systeme war die Konfiguration des Interferometers auf Basis der analgenspezifischen Daten der optischen Wegstrecke von der Sensorschnittstelle zum Werkstück. Alle diese Informationen müssen bei der Konfiguration des Referenzweges berücksichtigt werden bis hin zu den Glasstärken der Linsen im Bearbeitungskopf.
Mit Hilfe der Informationen über die unterschiedlichen Anlagen konnte der Strahlengang berechnet und die dafür notwendigen Komponenten bestimmt werden. Dabei war nicht nur die Position zur Einkopplung des Messstrahls von Bedeutung, zur Kompensation aller Dispersionseffekte sind die Informationen über die Anzahl, Dicke und Material der optischen Komponenten zwischen dieser Position und der Werkstückoberfläche in die Rechnung

einzubeziehen. Weitere Aktivitäten betrafen die Auswahl der Bauelemente für die Sensorik basierend auf der Kurzkohärenz-Interferometrie und da im Speziellen die Lichtquelle, welche in den Systemen verbaut werden soll. Diese Festlegung orientierte sich maßgeblich an der Wellenlänge des verwendeten Lasers.

2.2.5.1 Optimierung der OCT Sensorik

Eines der maßgeblichen Ziele der Firma Precitec war, die Performance von OCT-Systemen im Bereich 830nm und 1550nm zu vergleichen. Beides sind Systemvarianten, die für den Einsatz in der „normalen“ Lasermaterialbearbeitung angeboten werden. Natürlich sind die systemspezifischen Unterschiede (Scanner vs. Festoptik) der Anlass für die Optimierung der OCT-Sensorik beim Einsatz in den PBF-LB Anlagen.
Bei einer Scanneroptik ändert sich grundsätzlich je nach Auslenkwinkel der Galvo-Spiegel die Länge des Messweges. Das ist eine systeminhärente Tatsache. Im Rahmen von InSensa musste diese Messweglängen-Änderung systemtechnisch kompensiert und softwaretechnisch kalibriert werden. Letzteres haben die Projektpartner in der eigenen Anlagensoftware realisiert. Die Vorgehensweise war, eine Kalibrierplatte im Bauraum zu vermessen und die Daten als Look-Up-Table in die echten Messungen hineinzurechnen.
Precitec hat den Referenzweg derart optimiert, dass je nach Auslenkwinkel eine definierte Verlängerung, bzw. Verkürzung des Referenzweges möglich war. Zu sehen ist das in Abbildung 2-23 bei der Anlage am Fraunhofer IAPT.

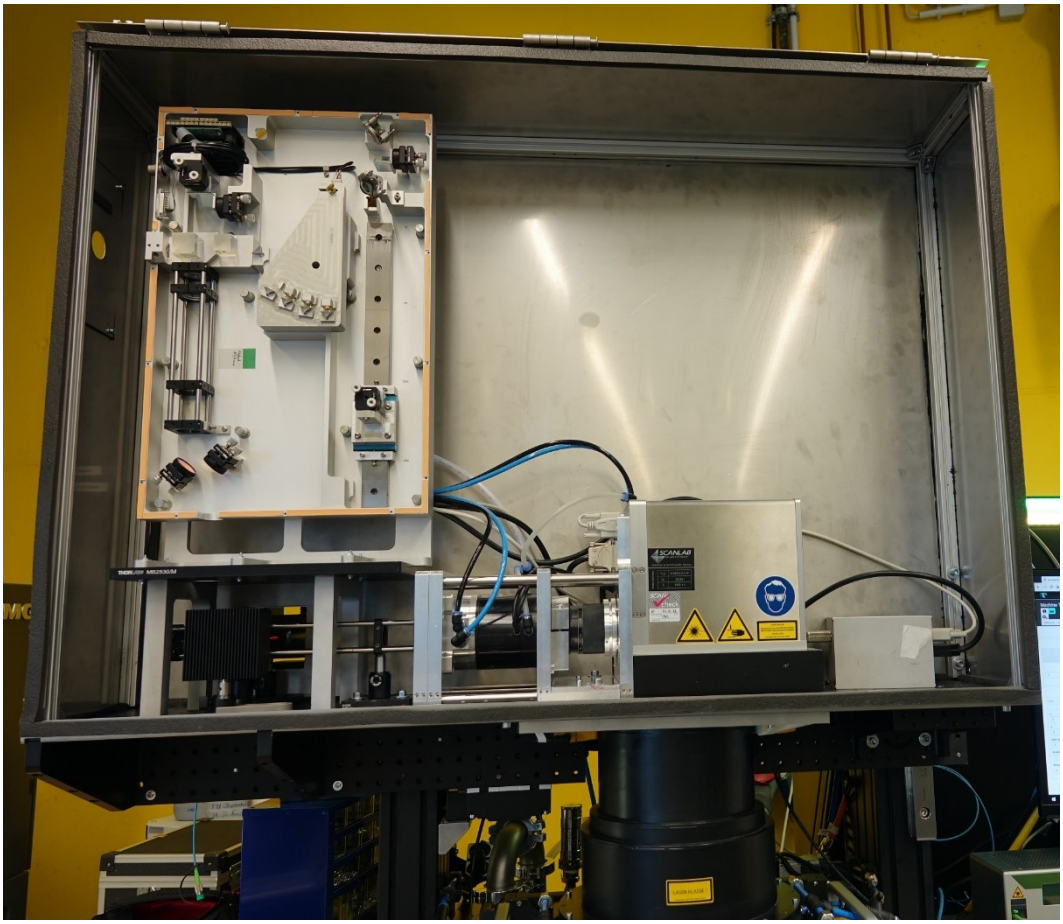


Abbildung 2-23 Gemeinsamer Strahlengang von Bearbeitungslaser und OCT Messlicht in der Anlage Fraunhofer IAPT mit Referenzbox

Eine Messung eines gedruckten Bauteils unter Einbeziehung von Kalibration und Weglängenkompensation zeigt Abbildung 2-24.

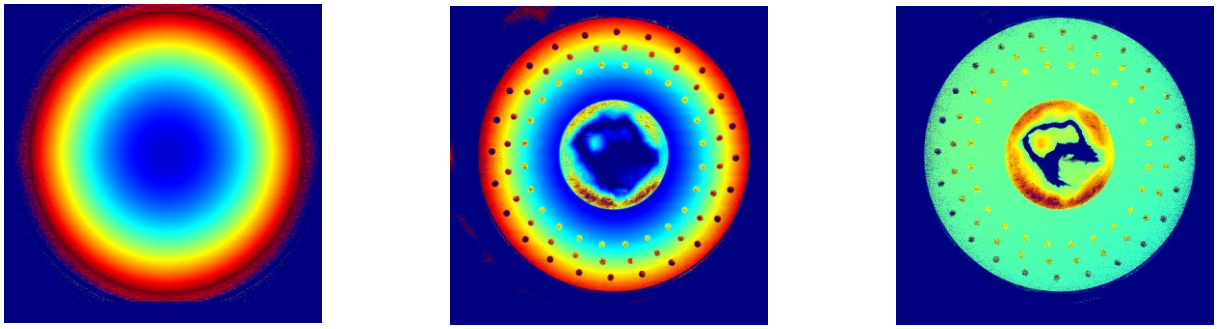


Abbildung 2-24 OCT Messungen eines Baujobs am Fraunhofer IAPT – links Bauplattform und rechts eine Zwischenebene (Original und kompensiert)

2.2.6 Bewertung der Sensoren

Basierend auf den Ergebnissen der Projektpartner wurde eine gemeinschaftliche Bewertung der untersuchten Sensoren und Sensormodalitäten vorgenommen. Hierbei wurden Vor- und Nachteile in Bezug auf

1. Integrationsaufwand
2. Kalibrationsaufwand
3. Einfluss auf Druckzeit
4. Bedienbarkeit
5. Reproduzierbarkeit/Übertragbarkeit zwischen Baujobs und Maschinen

gesammelt, sowie die Praxistauglichkeit für die Prozessüberwachung und -regelung erfasst. Hierbei wurde im Besonderen die erfolgreiche Detektion von Prozessfehlern bzw. -abweichungen in Bauprozessen betrachtet.

Bei den koaxial messenden Sensoren („on-axis“) Pyrometer, OCT-Sensor und IR-Kamera erfolgt eine direkte Messung von Eigenschaften des Schmelzbades. Die gesammelten Eigenschaften dieser Sensoren werden im Folgenden präsentiert.

Pyrometer

- Vorteile
  - Direkte Messung der vom Schmelzbad emittierten IR-Strahlung
  - Hohe Messfrequenz (100 kHz) möglich
  - Gute Interpretierbarkeit: Intensität ist proportional zu Temperatur
  - Verwendung von Pyrometern mit unterschiedlichen Wellenlängenbereichen nach einmaliger Integration möglich
  - Messwert der verwendeten Photodiode nicht von Eigentemperatur abhängig (keine Drift)
- Nachteile
  - Übertragbarkeit der Messungen eingeschränkt (Werkstoffe, Maschinen)
  - Optische Integration erfordert Modifikation des Strahlgangs und Justage des Messorts
  - Messort und –winkel (Messfleckgröße und –position relativ zum Arbeitslaser) nur schwer bestimmbar, Winkel beeinflusst gemessene Intensität
  - Kalibration zur Messung absoluter Temperatur nicht praktikabel
  - Signalintensität hängt von optischer Integration und Oberflächenbeschaffenheit der Messfläche ab
  - Sensor integriert über Messfleck, „mischt“ Pulverphase mit Schmelzphase – erhöhte Messunsicherheit
- Schnittstellen und Kalibration

    - Elektrische Integration sollte industrieübliche Schnittstellen (z.B. Stromsignal 4…20mA, Spannung 0…1/0…10V, Sensorstecker M8/M12) nutzen
    - Fasereinkopplung muss im Laserbetrieb einstellbar sein (extern zugänglich, nicht in optischer Bank)
- Prozessregelung
    - Korrelation der Messung mit Temperatur ermöglicht direkte Verwendung in Regelung
    - Eindimensionales Signal erleichtert Einbindung des Messwerts
    - Im Projekt erfolgreich umgesetzt
- Prozessüberwachung
    - Detektion von heißeren/kälteren Stellen möglich: „Wahrscheinlichkeit eines Defekts“; Korrelation mit Energieeintrag
    - Keine endgültige Aussage über Entstehung von Defekten
    - Fehlerhafter Pulverauftrag ist im Messsignal erkennbar
    - [SigmaLabs: Detektion von einzelnen Gasporen mit 80% Sensitivität]

OCT-Sensor

- Vorteile
    - Aktives Messprinzip erleichtert Bestimmung des Messorts und -winkels (per CCD-Sensor)
    - Hohe Messfrequenz möglich (70 kHz, geplant: 500 kHz)
    - Übertragbarkeit der gemessenen relativen Höhe (über Bauebene)
    - Kein Einfluss auf Druckzeit (bei Schmelzbadüberwachung)
- Nachteile
    - Integration erfordert Modifikation des Strahlgangs und Justage des Messorts
    - Eingeschränkter Messbereich (in z) beschränkt Messfeldradius um Scanner-ursprung
    - Messung von Stufengeometrien kann zu FFT-Artefakten und springenden Messwerten führen
    - Datenvorverarbeitung (Messfeldkorrektur) erforderlich
    - Empfindlichkeit ggü. externen Vibrationen
- Prozessregelung
    - Verwendung des OCT-Signals als Regelgröße nicht erprobt
- Prozessüberwachung
    - Messung von Bauteilverzug möglich
    - Hochauflösende Erfassung der Schichttopographie (Pulverauftrag +2 min pro Schicht, belichtetes Bauteil) möglich
    - Bildung von Keyholes konnte nicht beobachtet werden

IR-Kamera (on-axis)

- Prozessüberwachung
    - Vorteile
        - Temperaturverlauf des Schmelzbads messbar (örtlich und zeitlich)
        - Integration: Ausrichtung der Kamera über Laserspot als Referenzpunkt unproblematisch
    - Nachteile
        - Kalibration zur Messung von Absoluttemperatur hier nicht möglich
        - Messfrequenz auf 1 kHz begrenzt (bei reduziertem Bildfeld)
- Prozessregelung
    - Verwendung des 2D-Messsignals erfordert Vorverarbeitung (optional: Vorver-arbeitung bereits auf Kamera oder Ausgabe als Spannungssignal)
- Prozessüberwachung

    - Bei niedrigen Scangeschwindigkeiten (600 mm/s) konnte Überhitzung an Wendepunkten beobachtet werden (Aufnahme mit 1 kHz)

Neben der direkten Vermessung des Schmelzbades ist auch eine Überwachung der Bauplattforms unabhängig von der aktuellen Scannerposition durch die „off-axis"-Platzierung von IR-Kamera und 3D-Kamerasystem möglich.

Durch den betrachteten Ausschnitt, der wesentlich größer als das Schmelzbad ist, und durch die langsameren Messungen, eignen sich diese Sensoren eher für eine Prozessregelung auf der Ebene von Bauteilen oder ganzen Schichten (vgl.).

IR-Kamera (off-axis)

- Vorteile
    - Temperaturverlauf des Bauteils messbar (örtlich und zeitlich)
    - Integration (off-axis) mit geringem Aufwand möglich
    - off-axis: Bestimmung des Messfelds direkt über Kamerabild möglich
- Nachteile
    - Kalibration zur Messung von Absoluttemperatur hier nicht möglich
    - Messfrequenz (80 Hz bei voller Bildauflösung, 1 kHz bei reduziertem Bildfeld) zu niedrig für Überwachung des Schmelzvorgangs
- Prozessregelung
    - Verwendung des 2D-Messsignals erfordert Vorverarbeitung (optional: Vorverarbeitung bereits auf Kamera)
- Prozessüberwachung
    - Überhitzung z.B. in Folge von Supportabbruch, Geometrie (mangelnde Wärmeableitung) konnte erkannt werden
    - 2D-Sensor erzeugt potentiell große Datenmengen (10^2…10^3 GiB/Job), die komplette Dokumentation unwirtschaftlich machen kann

3D-Kamera

- Vorteile
    - Schnelle Erfassung (800 ms) der Schichttopografie
    - Sensor kalibriert sich im Prozess selbst
    - Sensor stellt fertig berechnete 3D-Punktwolke zur Verfügung
- Nachteile
    - Integration wird durch großen Platzbedarf im Bauraum erschwert
- Prozessregelung
    - Keine Erfahrungen gesammelt
- Prozessüberwachung
    - Messung von Bauteilverzug und Pulverauftrag möglich

2.3. Prozessüberwachung

2.3.1 Provokation von Prozessfehlern

Prioritäten der Probekörper

Die Fehler des Fehlerkatalogs wurden mit einer Risikoprioritätsnummer (RPN) kategorisiert. Die RPN wurde mit der folgenden Formel berechnet: $\mathrm{RPN} = S\ x\ A\ x\ E$, mit

- Schweregrad (S). Stellt die Größe der Auswirkung dar, die dieser Fehler verursachen wird
- Auftrittswahrscheinlichkeit (A). Stellt die Auftrittswahrscheinlichkeit dar, die ein Fehler haben kann.
- Erkennbarkeit (E). Steht für die Einfachheit, mit der ein Fehler erkannt werden kann.

Für die Berechnung der Werte der Variablen der RPN, wurden die Eingaben verschiedener Technologieexperten berücksichtigt. Diese Werte wurden durch eine Umfrage bestimmt, die von Mitarbeitern des Instituts für Additive Fertigung Fraunhofer IAPT ausgefüllt wurde. Die Ergebnisse der Risikopriorisierung sind in Tabelle 1 dargestellt. Diese zeigt, dass Lack-of-Fusionporen und Gasporen die höchste RPN haben. Deswegen wurden diese Defekte für die Entwicklung von Probekörper zur Fehlerprovokation priorisiert. Als Vorbedingung für die Versuche zur Fehlerdetektion wurden Probekörper und Prozessparameter entwickelt. Das Ziel des Vorhabens war die zuverlässige und wiederholbare Fehlerprovokation, um Korrelationen zwischen die Sensorsignale und die Bauteilfehler zu finden. Die Probekörper und Prozessparameter wurden entwickelt, um die relevanten Fehler des Fehlerkatalogs zu provozieren.

Tabelle 1 Risikoprioritätsnummer für ausgewählte Prozessfehler

Fehler	Schweregrad	Auftrittswahrscheinlichkeit	Erkennbarkeit	RPN
Verunreinigung des Pulverbetts (Lack-of-Fusion Poren)	8.8	7.1	6.1	378.0
Turbulentes Schmelzbad (Gas Poren)	7.8	8.4	7.0	457.7
Beschichtungsfehler	4.7	7.0	5.0	162.0
Wärmestau	5.2	3.2	4.9	80.8
Bauteilverzug und Rissbildung	7.9	5.9	4.3	199.1
Balling-Effekt	7.1	5.5	4.3	167.0
Versatz im Bauteil	7.5	2.5	3.5	67.2
Schichtversatz	9.3	3.0	3.8	105.0

2.3.1.1 Darstellung des Prozessfensters

Der Probekörper besteht aus neun Segmenten, die mit unterschiedlichen Energiedichten aufgebaut sind. Die Energiedichte wird variiert, indem nur ein Parameter in der Scanstrategie verändert wird. Ziel ist, das Prozessfenster des getesteten Materials in einem einzelnen Probekörper darzustellen. Diese Probekörper wurden benutzt, um eine Korrelation zwischen die Outputs der Sensoren und die Porosität aufgrund der angebrachte Energiedichte festzustellen.

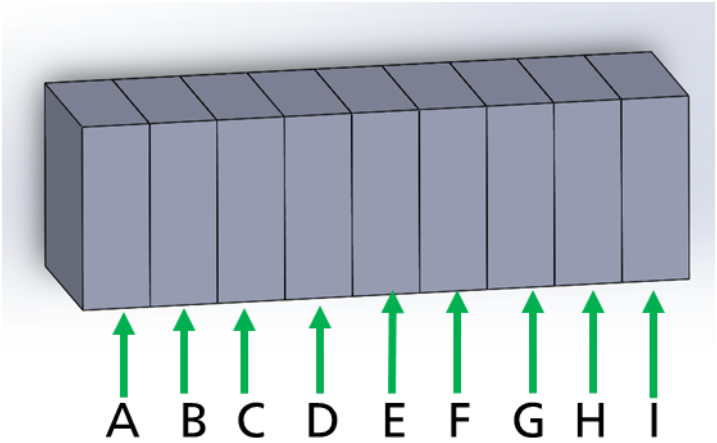


Abbildung 2-25 CAD-Modell des Probekörpers zur Darstellung des Prozessfensters

Parametersätze: Die Scanstrategie ist auf den Standardparametersatz für das Füllmaterial basiert mit Ausnahme der in der folgenden Tabelle angegebenen Parameter:

Variante 1: Konstante Laserleistung, variierende Scangeschwindigkeit

Parameter-satz	Scangeschwindigkeit	Laserleistung
A	2 x Standard	Standard
B	1.6 x Standard	Standard
C	1.33 x Standard	Standard
D	1.14 x Standard	Standard
E	Standard	Standard
F	0.8 x Standard	Standard
G	0.66 x Standard	Standard
H	0.57 x Standard	Standard
I	0.5 x Standard	Standard

Variante 2: Konstante Scangeschwindigkeit, variierende Laserleistung

Parameter-satz	Scangeschwindigkeit	Laserleistung
A	Standard	0.5 x Standard
B	Standard	0.63 x Standard
C	Standard	0.75 x Standard
D	Standard	0.88 x Standard
E	Standard	Standard
F	Standard	1.25 x Standard

G	Standard	1.5 x Standard
H	Standard	1.75 x Standard
I	Standard	2 x Standard

Provozierte Fehler: Lack-of-Fusion- und Gasporosität.

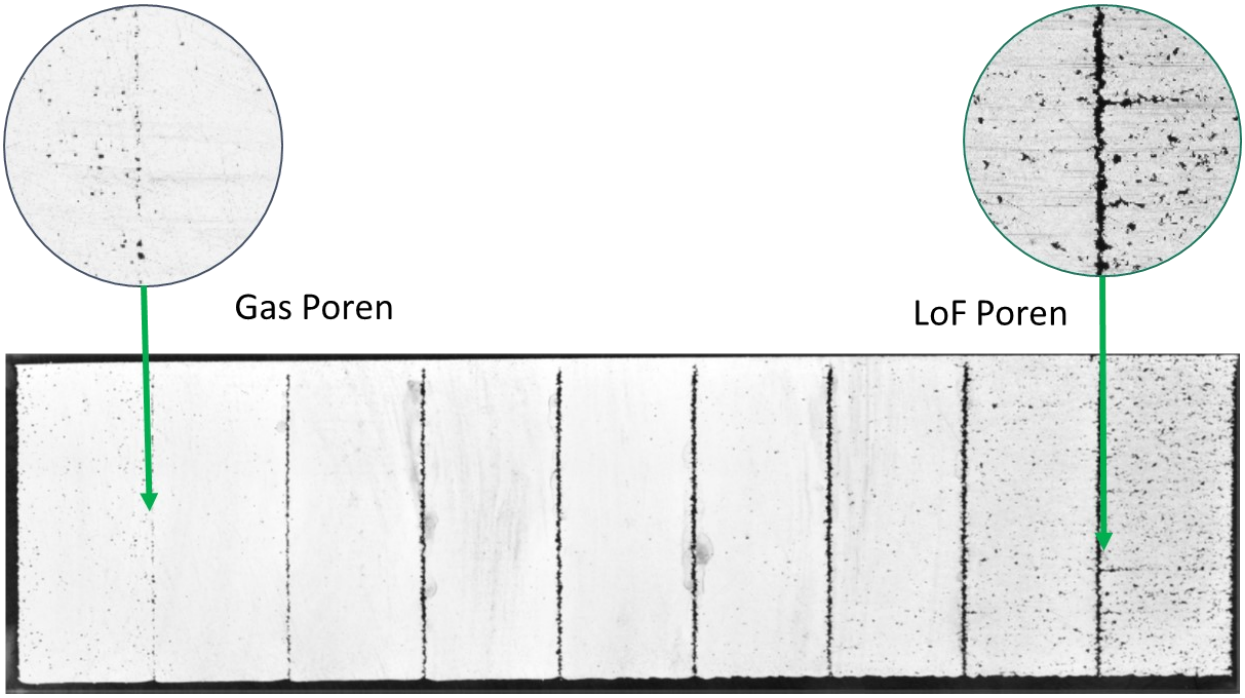
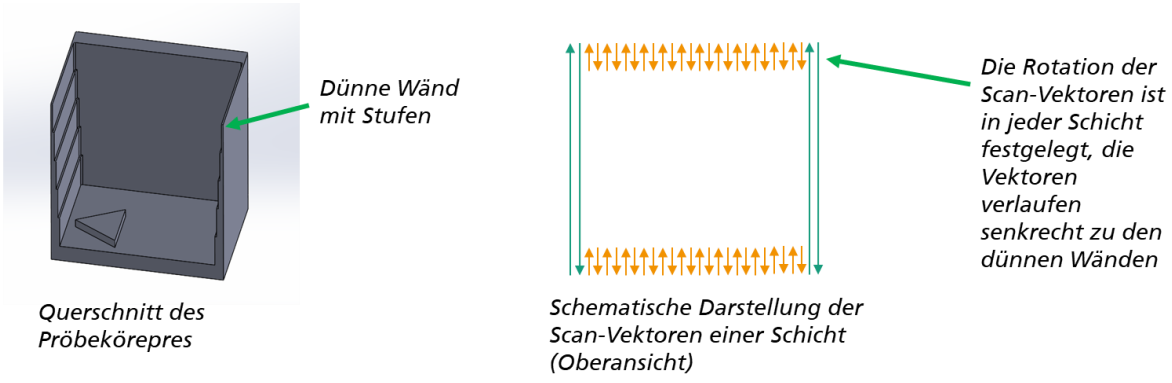


Abbildung 2-26 Schliffbilder des Probekörpers zur Darstellung des Prozessfensters

2.3.1.2 Kurze Scanvektoren – Variante 1

Der Probekörper enthält dünne Wände mit einer „Treppengeometrie“, die mit kurze Scanvektoren aufgebaut ist. Die Scanvektoren laufen senkrecht zu den Stufen und werden mit zunehmender Bauhöhe kleiner. Die kurzen Scanvektoren verursachen eine lokale Erhöhung der Energiedichte, die die Provokation von Gasporosität fördert.



3

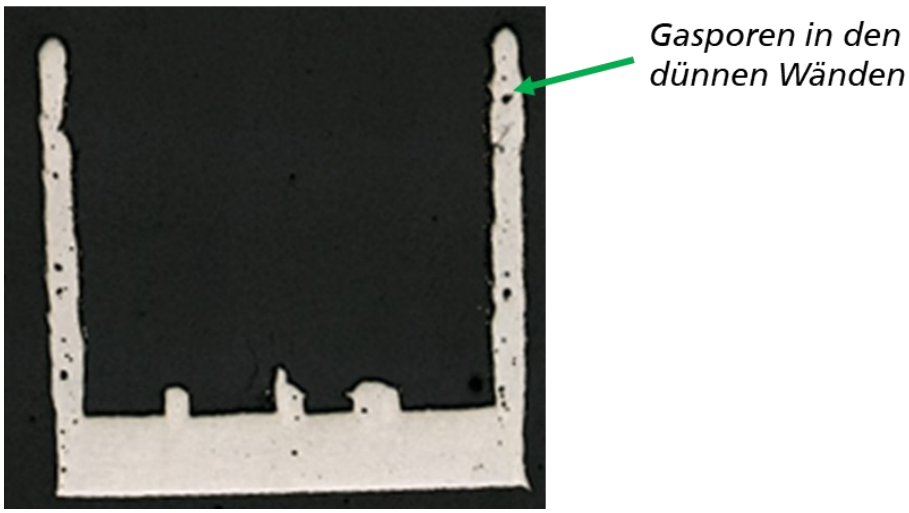
Parametersatz

Alle Eingaben der Parametersatz sind Standard, außer den unten angegebenen

Parameter	Eingabe
Konturen	Aus
Skywriting	Aus
Rotation der Scanvektoren	Fixiert, die Scanvektoren laufen senkrecht zu den dünnen Wänden
Scanmuster	Kontinuierlich

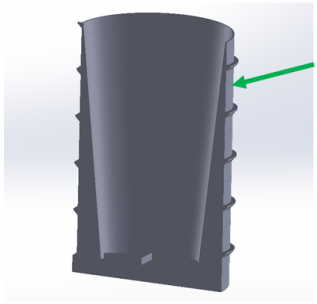
Provozierte Fehler:

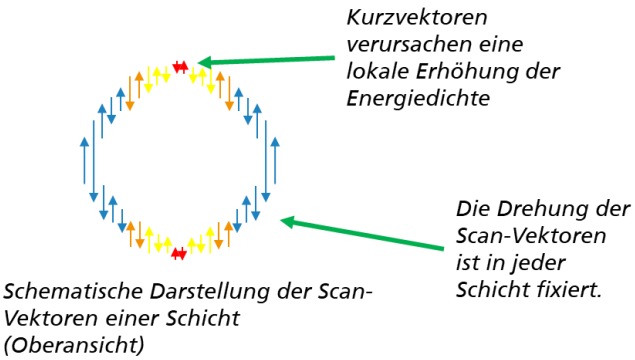
Gasporosität



2.3.1.3 Kurze Scanvektoren – Variante 2

Der Probekörper ist ein Hohlzylinder, dessen Wände mit zunehmender Bauhöhe dünner werden. Die Rotation der Scanstrategie ist fixiert, damit die Länge der Scanvektoren kurzer mit zunehmender Bauhöhe wird. Die kurzen Scanvektoren verursachen eine lokale Erhöhung der Energiedichte, die die Provokation von Gasporosität fördert.





Schematische Darstellung der Scan-Vektoren einer Schicht (Oberansicht)

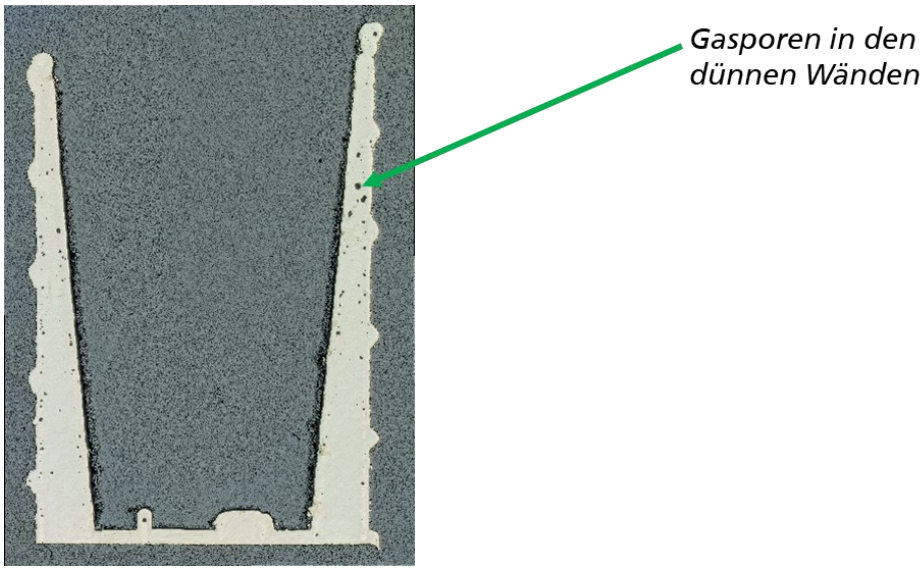
Parametersatz

Alle eingaben der Parametersatz sind Standard für Füllmaterial, außer den unten angegebenen

Parameter	Eingabe
Konturen	Aus
Skywriting	Aus
Rotation der Scanvektoren	Fixiert, die Scanvektoren laufen senkrecht zu den dünnen Wänden
Scanmuster	Kontinuierlich

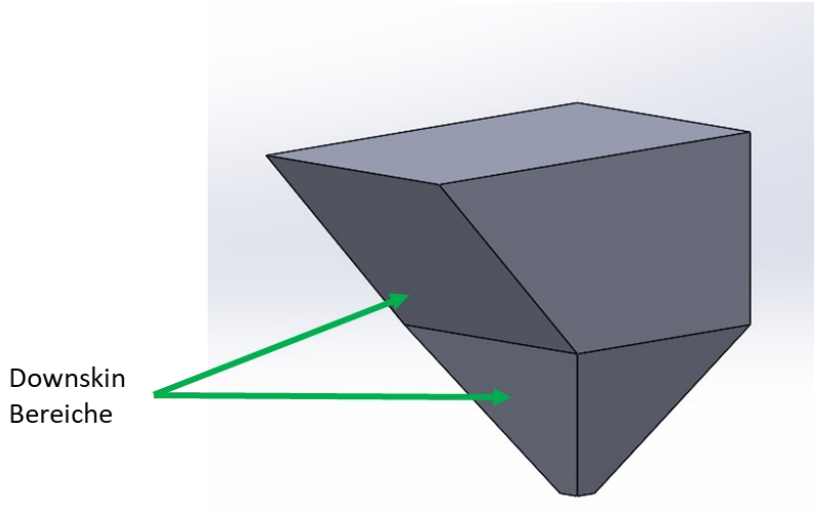
Provozierte Fehler:

Gasporosität



2.3.1.4 Probekörper mit Downskin-Bereichen

Überhänge (Downskins) sind häufige geometrische Merkmale in LPBF-Teilen, sie sind sehr anfällig für Gasporosität aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit des darunterliegenden Pulvers. Die Wärme aus dem Prozess staut sich in diesen Bereichen und fördert die Bildung von Keyholes, die die Bildung von Gasporen provozieren. Die Probekörper wurden mit mehreren Downskin-Bereichen konstruiert, um Gasporen zu provozieren.



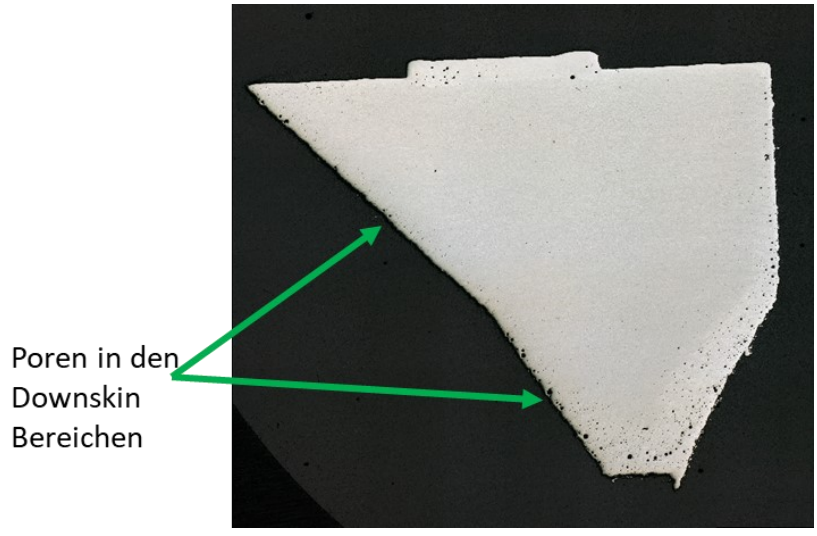
Parametersatz

Alle Eingaben des Parametersatzes folgen dem Standard für Füllmaterial, außer den unten angegebenen

Parameter	Eingabe
Downskin-Parameter	Aus
Konturen	Aus

Provozierte Fehler:

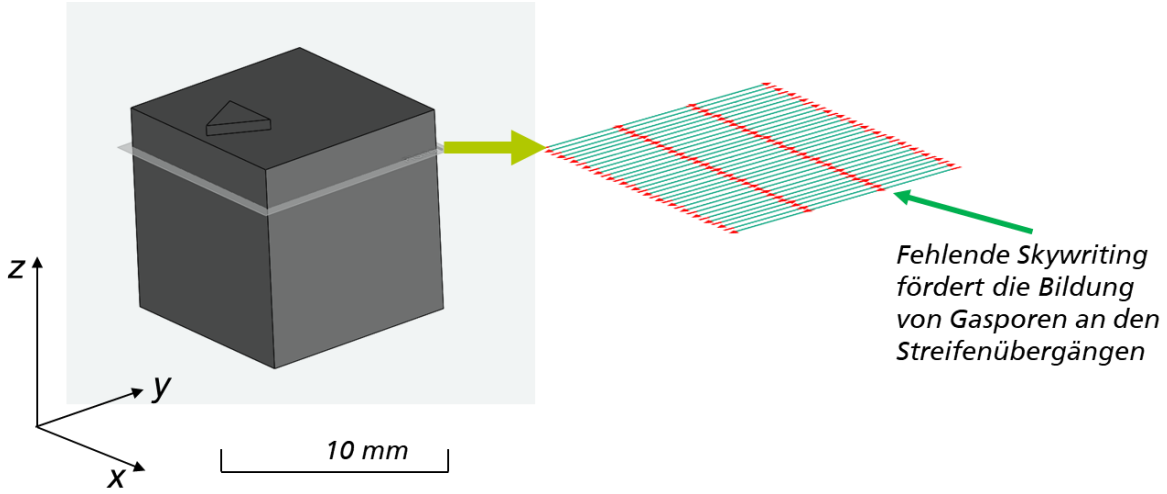
Gasporosität



2.3.1.5 Poren an den Streifenübergängen

Der Anfang und das Ende der Scan-Vektoren sind besonders anfällig für die Erzeugung von Gasporosität. Die Beschleunigung und Abbremsung der Spiegel des Scanners mit einer konstanten Laserleistung fördert die Bildung von Keyholes, die die Bildung von Gasporen provozieren. Ein Bereich, in dem diese Bedingungen auftreten ist an den Streifenübergängen. Die

Probekörper provozieren die Bildung von Gasporen durch das fehlende Skywriting und die festgelegte Position der Streifenübergänge in jeder Schicht.



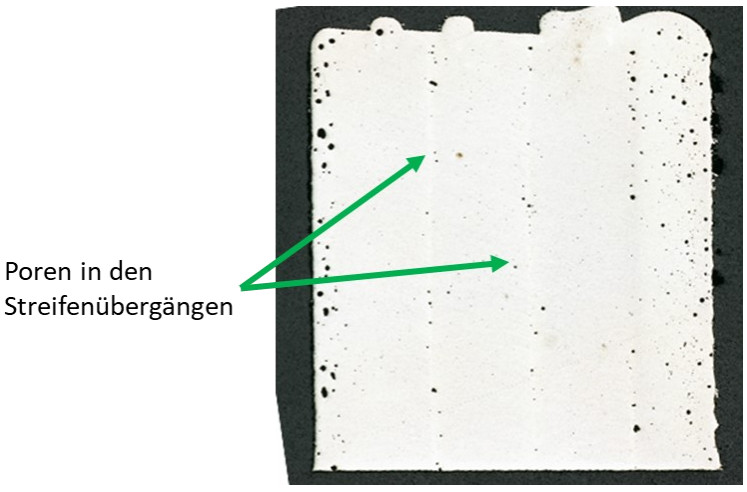
Parametersatz

Alle Eingaben des Parametersatz folgen dem Standard für Füllmaterial, außer den unten angegebenen

Parameter	Eingabe
Konturen	Aus
Rotation der Scanvektoren	Aus
Skywriting	Aus
Scanmuster	Streifen
Streifenbreite	2,5 mm
Streifenübergang	0,1 mm

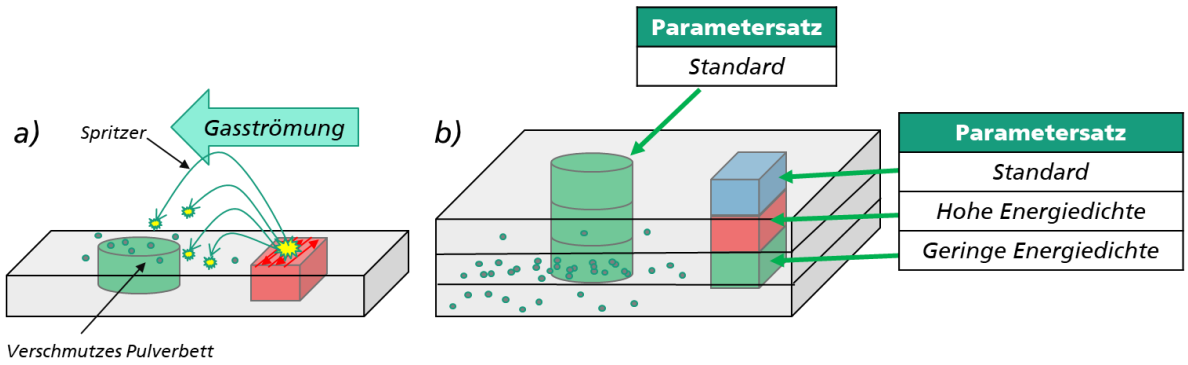
Provozierte Fehler:

Gasporosität



2.3.1.6 Verschmutzung des Pulverbetts

Spritzer treten beim L-PBF-Prozess grundsätzlich auf. Diese landen auf dem Pulverbett und sind eine Ursache für Lack-of-Fusion-Porosität. Um diesen Effekt zuverlässig zu reproduzieren, wird eine Wand, die Spritzer erzeugt am Gasauslass gebaut. Die Wand wurde in drei unterschiedlichen Segmenten gebaut, jedes Segment wurde mit unterschiedliche Energiedichten gebaut, um unterschiedliche Mengen an Spritzern zu erzeugen. Die Spritzer werden vom Prozessgas getragen und landen auf dem Pulverbett und verschmutzen es. Mehrere Zylinder sind mit Standard-Parametersätze in dem verschmutzten Pulverbett gebaut. Lack-of-Fusion-Porosität tritt aufgrund der von Spritzer verschmutzen Pulverbett in den Zylinder auf.



Parametersätze

Alle eingaben der Parametersatz sind der Standard für Füllmaterial, außer den unten angegebenen

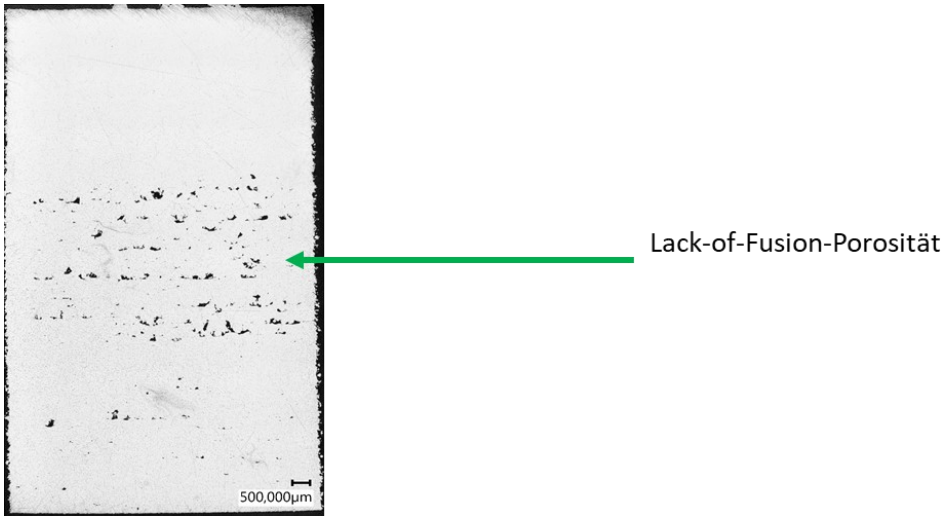
Globale Parameter	**Eingabe**
Belichtungsreihenfolge	In Richtung der Gasströmung
Leistung der Prozessgasströmungsturbine	40%

Parametersatz hohe Energiedichte	**Eingabe**
Laserleistung	150%
Scangeschwindigkeit	30%

Parametersatz geringe Energiedichte	**Eingabe**
Laserleistung	75%
Scangeschwindigkeit	170%

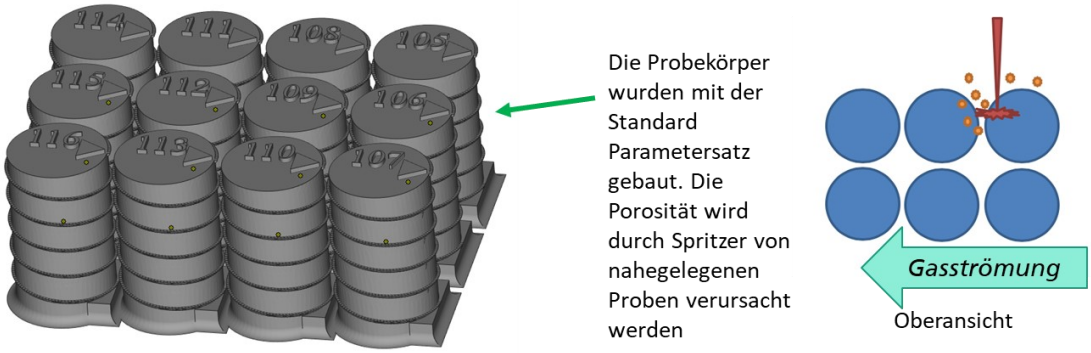
Provozierte Fehler:

Lack-of-Fusion-Porosität



2.3.1.7 Spritzer aus benachbarten Teilen

In manchen Situationen im LPBF-Prozess landen die Spritzer von belichteten Oberflächen auf dem Pulvermaterial von nicht belichteten Oberflächen, was die Wahrscheinlichkeit erhöht, LoF-Poren in den Bauteilen zu erhalten. Mehrere zylindrische Probekörper wurden mit geringem Abstand voneinander positioniert, um eine lokale Verschmutzung des Pulverbettes zu erzeugen. Dieser Effekt wird durch die Einstellung der Belichtungsreihenfolge in Richtung der Gasströmung verstärkt.



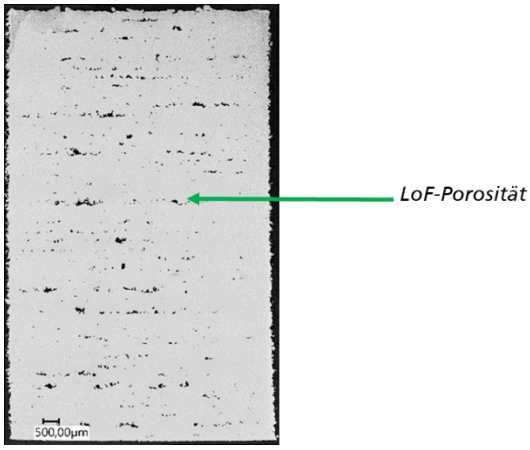
Parametersätze

Alle eingaben der Parametersatz sind der Standard für Füllmaterial, außer den unten angegebenen

Globale Parameter	**Eingabe**
Belichtungsreihenfolge	In Richtung der Gasströmung
Leistung der Prozessgasströmungsturbine	40%

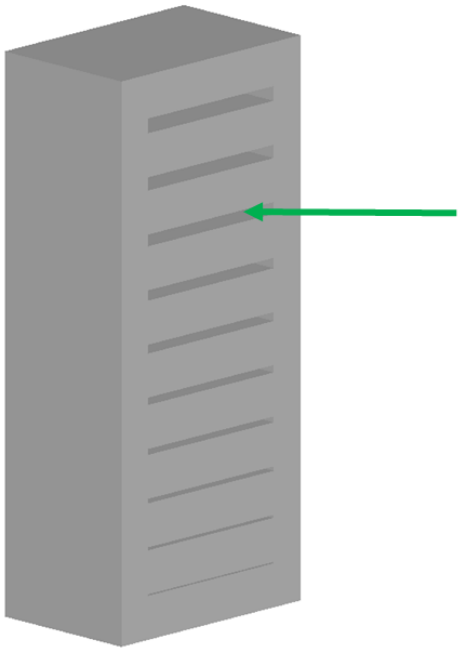
Provozierte Fehler:

Lack-of-Fusion-Porosität



2.3.1.8 Variationen in der Schichtstärke

Der Probekörper erhält Lücken mit zehn unterschiedlichen Höhen, die den Effekt von Schmelzen unterschiedlicher Schichtstärken mit denselben Belichtungsparametern simuliert. Die belichtete Fläche, die die Lücken schließt, zeigt unterschiedliche thermische Eigenschaften im Vergleich zum Vollmaterial. Lack-of-fusion-Porosität wird erzeugt, wenn die Energiedichte des Prozesses für das vollständige Schmelzen der Pulverschicht nicht ausreichend ist.



Schichtstärke: Standard	
Lücke	**Höhe**
1	10 x Schichtstärke
2	9x Schichtstärke
3	8 x Schichtstärke
4	7x Schichtstärke
5	6 x Schichtstärke
6	5 x Schichtstärke
7	4 x Schichtstärke
8	3 x Schichtstärke
9	2 x Schichtstärke
10	1 x Schichtstärke

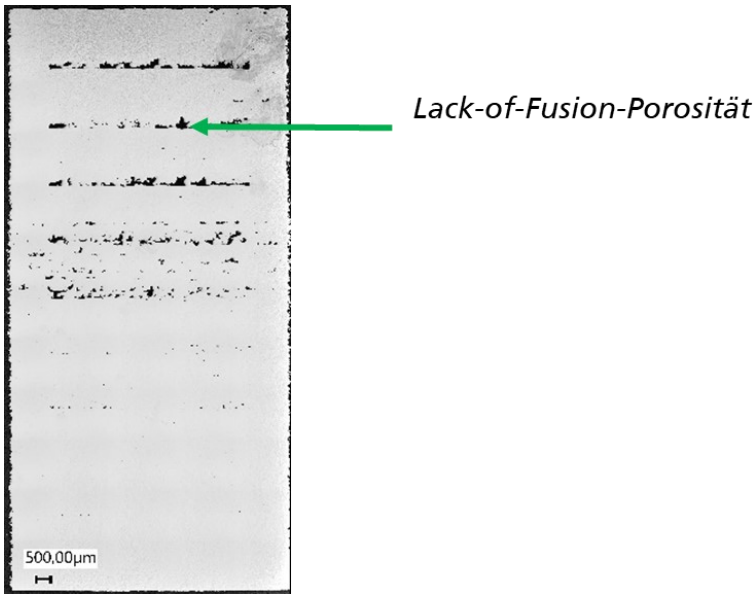
Parametersatz

Die Parameterwerte entsprechen dem Standard für Füllmaterial, außer den unten angegebenen

Parameter	**Eingabe**
Downskin-Parameter	Aus

Provozierte Fehler:

Lack-of-Fusion-Porosität



2.3.2 Integration einer Regelhardware in eine SLM-Anlage

Im Rahmen des Projekts wurde eine Forschungs-PBF-LB/M -Anlage auf den Betrieb mit der modularen Echtzeit-Steuerungsplattform (Materialise Control Platform, MCP) umgerüstet. Hierzu wurde die MCP direkt an die speicherprogrammierbare Steuerung einer BLT S310 PBF-LB/M-Anlage angebunden, um die elektromechanischen Funktionen der Forschungsanlage bedienen zu können. Zusätzlich wurden angepasste Bauskripte entwickelt, die eine benutzerdefinierte Anpassung des Bauprozesses ermöglichen und z.B. die Aufnahme von Sensordaten nach ausgewählten Prozessschritten beinhalten. Durch die Umrüstung wurde eine offene Versuchsplattform geschaffen, die die Sensorintegration und die Durchführung von gezielten Experimenten zu definierten Prozessfehlern ermöglicht. Die Möglichkeiten und Vorteile einer offenen Plattform für die Prozessüberwachung wurden in einem Konferenzbeitrag veröffentlicht [Jac20].

2.3.3 Sensorintegration

Während der Entwicklung der neuartigen Sensoren zur Prozessüberwachung wurden die Softwareschnittstellen der MCP zur Weiterverarbeitung der Messdaten mit den Sensorherstellern abgestimmt und spezifiziert. Hierbei mussten die Zeitanforderungen für eine direkte Verwendung der Messdaten im Prozess berücksichtigt werden, sodass für die schnellsten Sensoren (Pyrometer, 100 kHz und OCT-Sensor, 70 kHz) eine elektronische Anbindung über eine Analogspannung ausgewählt wurde, die die Messwerte mithilfe des A/D-Wandlermoduls der MCP direkt zur Verfügung stellt. Die IR-Kamera konnte direkt über den entsprechenden Linux-Treiber angesprochen werden, wobei der Zugriff auf die Rohdaten des Videostreams erst durch den Optris-Partner evocortex GmbH implementiert werden musste. Für die Anbindung des nur prototypisch eingesetzten 3D-Kamerasystems war ein minimales Protokoll auf TCP/IP-Basis vorgesehen, dieses konnte aber innerhalb der Projektlaufzeit nicht mehr erprobt werden, weil das 3D-Kamerasystem nicht rechtzeitig zur Verfügung stand.

Für die schnelle Erfassung der Messdaten wurde eine angepassten Protokollierungsfunktion auf der MCP implementiert, die die Eingangswerte des schnellen Wandlermoduls (100 kHz)

in einem von National Instruments definierten offenen Binärformat (TDMS[1]) abspeichert. Zur weiteren Verwendung im Projekt wurde eine selbstbeschreibende Datenstruktur (Abbildung 2-27) basierend auf dem netCDF-Standard[2] erarbeitet, die im offenen HDF5-Dateiformat komprimiert abgespeichert werden kann. Hierbei wurde insbesondere auf die Referenzierung der unterschiedlichen Messwerte in Bezug auf Scannerposition bzw. Position im Bauvolumen/Zeitpunkt geachtet, um eine korrekte Auswertung zu gewährleisten.

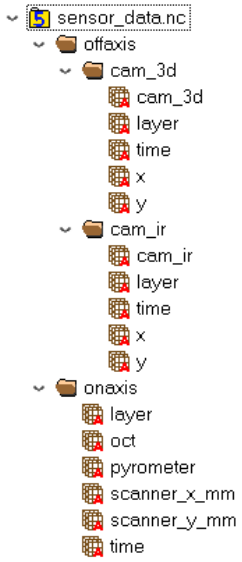


Abbildung 2-27 Datenstruktur zur Archivierung von Messwerten der eingesetzten Sensoren. Die Hierarchie bündelt Sensoren nach Position (on-axis/koaxial und off-axis) und integriert gemeinsame Referenzpositionen, z.B. die Scannerposition (x/y) und den Zeitpunkt für die Aufnahme der koaxialen Messungen (OCT-Sensor, Pyrometer).

Für die Integration der koaxialen Sensoren (Pyrometer, OCT-Sensor) in die Versuchsanlage bei Materialise GmbH wurde ein modularer optischer Pfad konstruiert und gefertigt. Nach dem Einbau des Strahlteilers zwischen Arbeitslaser und Sensoren wurde eine Verschlechterung des Strahlprofils des Arbeitslasers festgestellt (Abbildung 2-28), die einen Austausch des Spiegels erforderlich machte und einen Betrieb der Anlage mit modifiziertem optischem Pfad verhinderte. Aufgrund der nah beieinander liegenden Wellenlängen von OCT-Sensor und Arbeitslaser musste durch den Projektpartner Precitec eine Sonderanfertigung für alle im Projekt verwendeten Versuchsanlagen beauftragt werden.

[1] Technical Data Management Streaming, https://www.ni.com/de-de/support/documentation/supplemental/06/the-ni-tdms-file-format.html
[2] Network Common Data Form (NetCDF), https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/

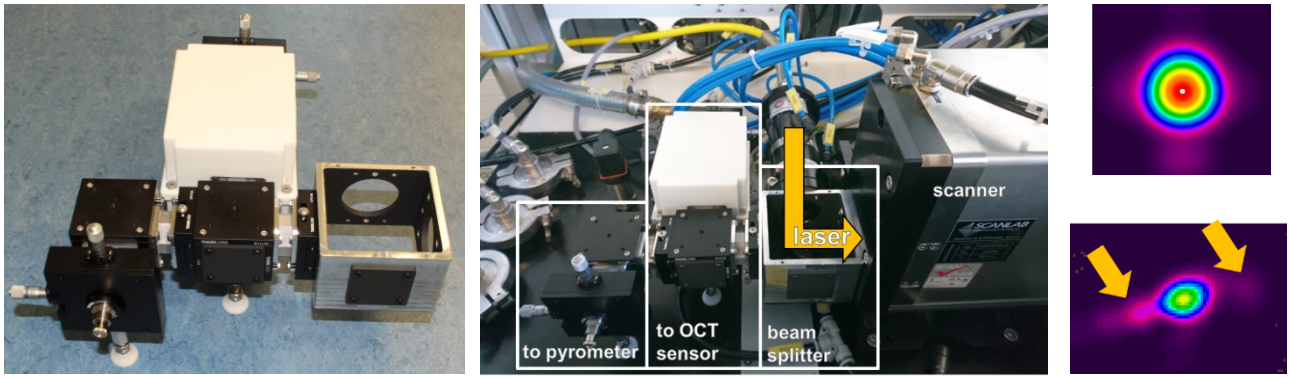


Abbildung 2-28 Modularer optischer Pfad zur Anbindung der Sensoren und Integration des Strahlteilers (links), Aufbau in der optischen Bank der Versuchsanlage (Mitte), Gegenüberstellung des Referenzstrahlprofils (oben) und des Strahlprofils nach Einbau des Strahlteilers (unten).

Die Integration des koaxialen OCT-Sensorsystems wurde gemeinsam mit der Precitec GmbH & Co. KG ausgeführt. Zur Nutzung des sensoreigenen Lasers wurde die Steuerungssoftware der MCP um Sicherheitsfunktionen zur Abschaltung des Lasers bei geöffneter Tür oder ungültigen Betriebszuständen erweitert. Für die hochfrequente Protokollierung der beiden koaxialen Sensoren wurde eine angepasste MCP-Firmware entwickelt und installiert, sodass beide Sensorwerte mit einer Abtastrate von 100 kHz erfasst werden können.

Da der OCT-Sensor eine interferometrische Distanzmessung vornimmt, muss zur Bestimmung der Höhe über der Bauplattform eine Referenzierung erfolgen. Dies kann über eine geometrische Betrachtung der unterschiedlichen optischen Weglängen oder eine Referenzmessung erfolgen. Um eventuelle Abweichungen der Substratplatte zu berücksichtigen, wurde hierzu eine automatische Kalibrierung über den Scan eines Kreuzmusters und die Anpassung zweier Polynome implementiert (Abbildung 2-29).

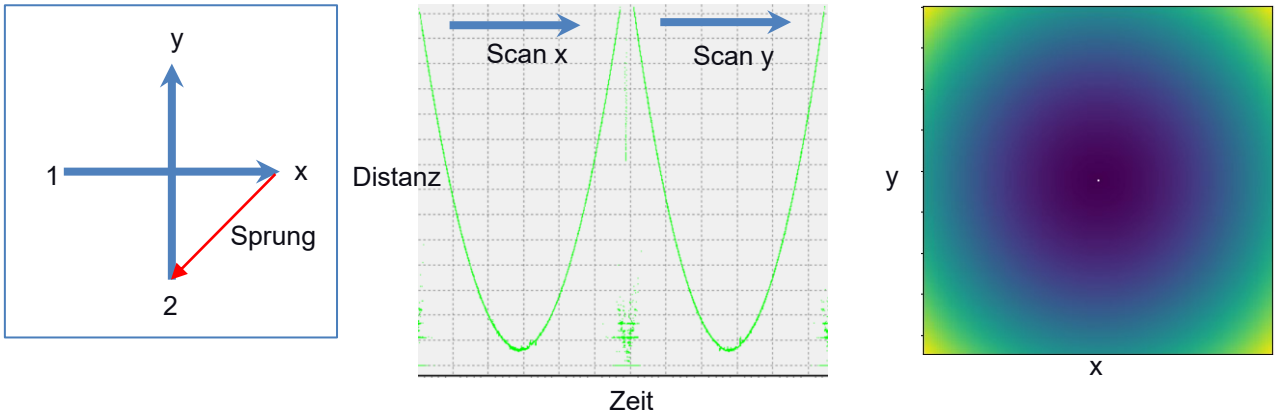


Abbildung 2-29 OCT-Kalibration: ein Kreuzmuster wird auf der Substratplatte gescannt (links), das resultierende Zeitsignal (Mitte) wird genutzt, um zwei Korrekturpolynome anzupassen, die die Basisdistanz zur Grundplatte beschreiben. Das Ergebnis lässt sich als interpolierte Distanzkarte (rechts) darstellen, über die die Höhe relativ zur Plattform berechnet werden kann.

2.3.4 Ansätze zur Fehlerdetektion

Eines der Hauptziele des Projekts war es, eine Korrelation zwischen dem Messsignal der Sensoren und den Bauteilfehlern zu ermitteln. In diesem Kapitel werden die wichtigsten Ergebnisse vorgestellt.

2.3.4.1 Fehlerdetektion mit der on-axis Wärmebildkamera

Es wurden mehrere Zylinder aus TiAl6V4 mit unterschiedlichen Energiedichten durch Variation der Laserleistung aufgebaut. Der Prozess wurde mittels der On-Axis-Kamera überwacht. Mit Hilfe der Bildverarbeitung war es möglich, die Pixelwerte der Bilder (die proportional zur Temperatur sind) mit der Menge der von der Kamera detektierten Pixel (die ein Maß für die Größe des Schmelzbads ist) zu plotten.

Das Ergebnis war ein Diagramm mit drei ausgeprägten Bereichen, in denen Standardparameter mit geringerer Porosität, Bereiche mit Gasporen und Bereiche mit Lack-of-Fusion-Porosität identifiziert werden konnten.

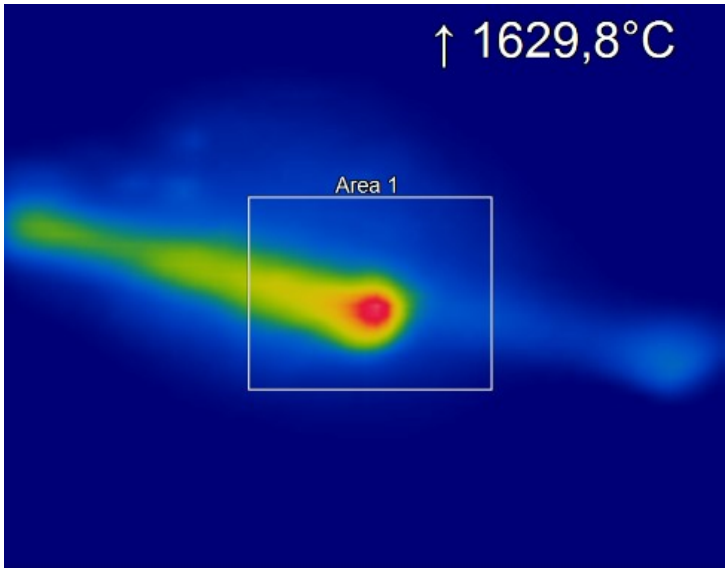


Abbildung 2-30 Aufnahme des Schmelzbades mit der on-axis Wärmebildkamera

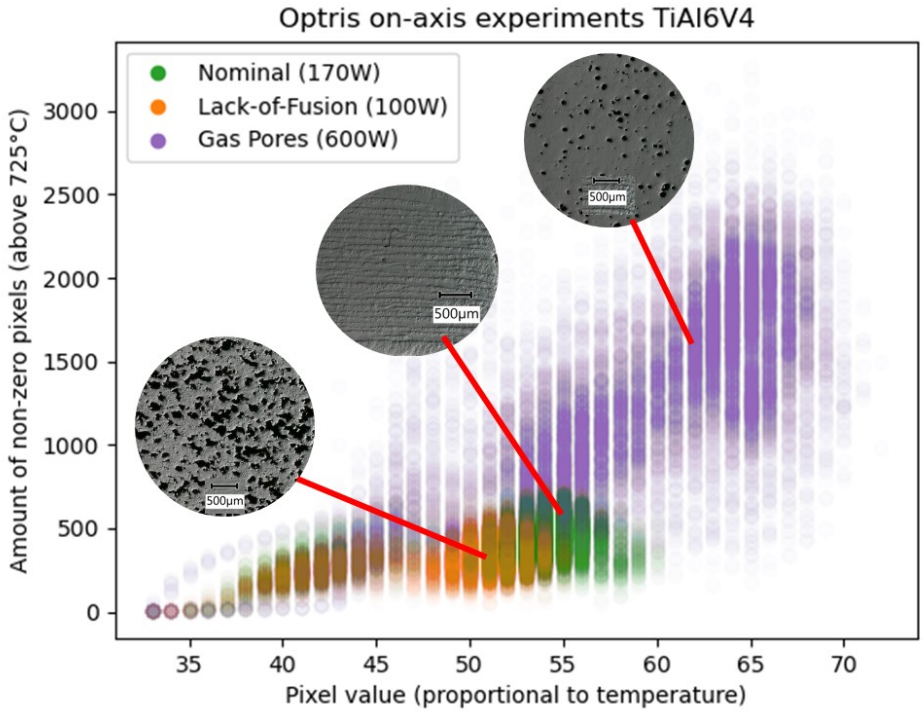


Abbildung 2-31 Diagramm der Anzahl von Pixeln vs. Pixelwert und die Bereiche mit Standardparameter, Gas- und Lack-of-fusion-Porosität

2.3.4.2 Detektion von Unregelmäßigkeiten im Pulverbett mit dem OCT-Sensor

Eine Schnittstelle zwischen Maschinen- und Sensorsoftware wurde erstellt. Zunächst wurde eine Methode entwickelt, welche die Messung des OCT-Sensors aktiviert. Daraufhin mussten die OCT-Sensordaten in Topografiedaten der Pulverbettoberfläche umgewandelt werden. Abschließend wurde die Oberflächentopografie mittels, um die Unregelmäßigkeiten im Pulverbett zu erkennen.

Die Ausgabe des OCT-Sensors ist eine Abstandsmessung zwischen Referenzebene und dem Messpunkt, welcher als Höhenmessung oder ZU-Koordinate eingesetzt werden kann. Um eine Topografiemessung zu generieren wurde ein Skript entwickelt, welches den Scanner an verschiedene vordefinierte Positionen des Werkstückes verfährt. Die Messung des OCT-Sensors wurde durch das Laser-On Signal des Bearbeitungslasers aktiviert, wobei die Laserleistung für diese Prozedur auf 0W gestellt wurde. Zuletzt wurde durch die Nutzung der X,Y Positionen (bekannt aus der Ausführungsliste des Skriptes) und der Z Positionen (Ausgabe des OCT Scanners) jedes Punktes eine Oberfläche gezeichnet. Abbildung 2-32 zeigt eine Skizze der Prozedur.

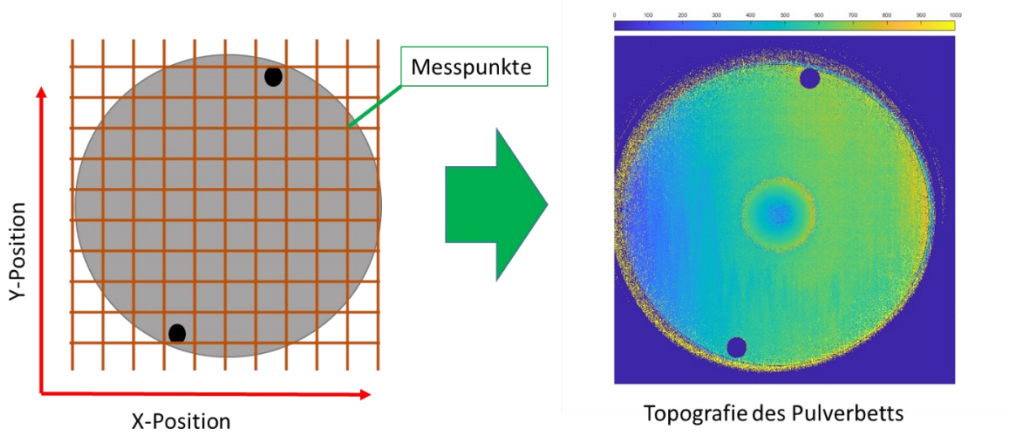


Abbildung 2-32 Prozedur zur Messung des Pulverbetts mittels OCT-Sensor

Die Topografieaufnahmen ermöglichten die Identifizierung von Unregelmäßigkeiten beim Pulverauftrag wegen Beschichtungsfehlern und Fehlern in der Nivellierung der Bauplattform. Diese Prozessabweichungen könnten Lack-of-Fusion-Porosität oder Geometrieabweichungen in der Endgeometrie verursachen (siehe unten).

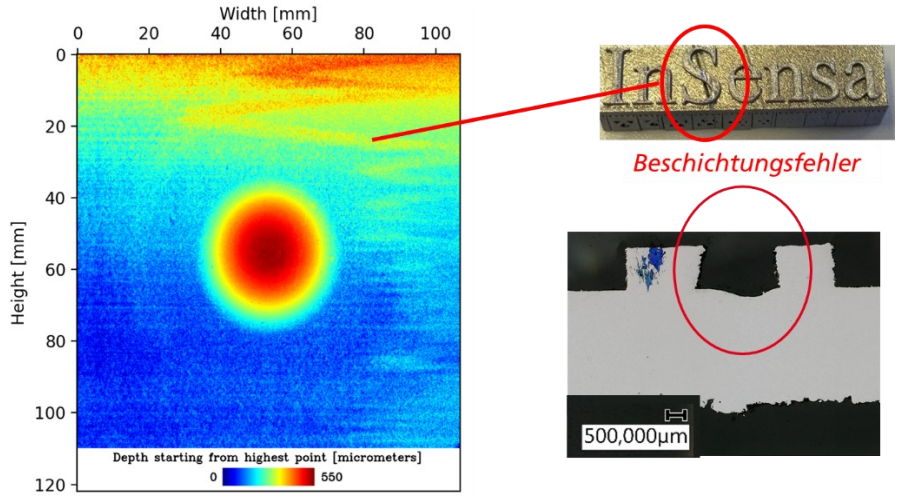


Abbildung 2-33 Erkennung von Beschichtungsfehlern mittels OCT-Sensor und die Geometrieabweichung in dem Bauteil. Der rote Kreis in der Mitte ist ein Bereich, in dem der Sensor gesättigt war.

2.3.4.3 Detektion von Prozessabweichungen mit dem kommerziellen Prozessüberwachungssystem

Das verwendete Prozessüberwachungssystem produziert Graustufenbilder jeder Schicht mit den Werten der Qualitätsmetriken. Die Bilder wurden verarbeitet, analysiert und mit Schliffbilder und µCT-Scans der Probekörper vergleicht, um Korrelationen zwischen Sensor-Output und Bauteildefekte zu erkennen. Zunächst wurden Scripts entwickelt, die potenziell Problematische Bereiche in den Baujobs automatisch erkennen könnten.

2.3.4.3.1 Detektion von Gasporosität

Ein Algorithmus zur Auswertung der thermischen Emissionen des Prozessüberwachungssystems zur Detektion von Gasporosität wurde entwickelt. Das implementierte Prozessüberwachungssystem erzeugt monochrom Bilder von drei Qualitätskennwerten, berechnet aus den thermischen Emissionen des Schmelzbades.

Die Qualitätskennwerte sind wie folgt benannt:

- TED: Thermische Energiedichte korreliert mit der auf den Prozess eingebrachten Energiedichte
- TEP: Thermische Energie Plank stellt die Temperatur des Schmelzbades dar.
- TEP Sigma: Die Standardabweichung der Temperatur des Schmelzbades.

Der Algorithmus analysiert die monochromen Bilder der drei Qualitätskennwerte in jeder Schicht und kennzeichnet Prozessanomalien auf folgender Basis:

1. Die Pixelgradienten des TED-Kennwertes überschreiten einen experimentell definierten Schwellenwert
2. Die Pixelgradienten der TEP und TEP Sigma Kennwerte überschreiten beide einen experimentell definierten Schwellenwert
3. Die Pixel, die die vorherigen Bedingungen erfüllen, haben eine Fläche größer als fünf Pixel
4. Die detektierten Anomalien befinden sich in zwei zusammenhängenden Schichten

Die Fähigkeit zur Fehlererkennung des Algorithmus wurde mittels Schliffbilder und µCT-Aufnahmen von Probekörpern validiert. Abbildung 2-34 zeigt die Schritte des Algorithmus auf einem Probekörper mit Poren auf den Streifengrenzen.

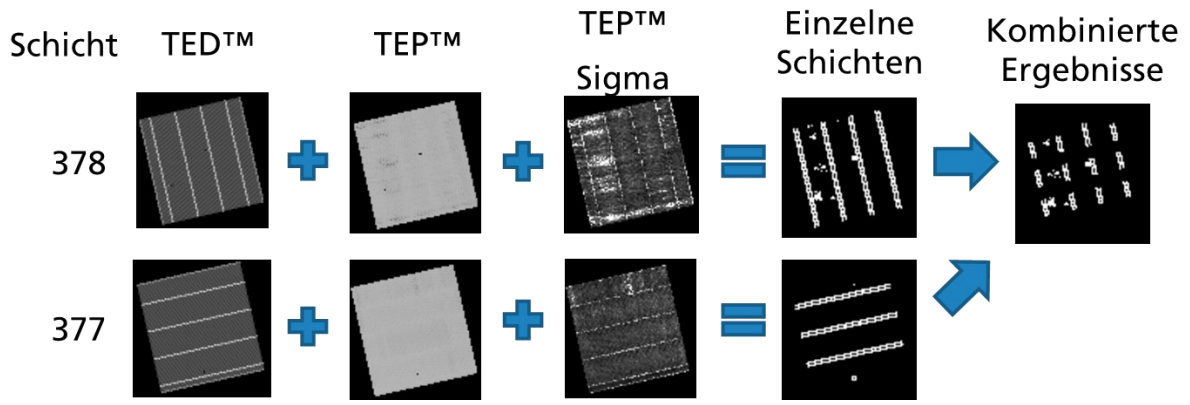


Abbildung 2-34 Darstellung der Schritte, die der Algorithmus zur Detektion von Anomalien durchführt.

Der Algorithmus wurde mit Aufnahmen von Probekörpern, die Gasporen aufgrund von Überhitzung an den Streifengrenzen erhalten, validiert. Die Porenketten an den µCT-Scans korrelieren mit den mit dem Algorithmus detektierten Anomalien.

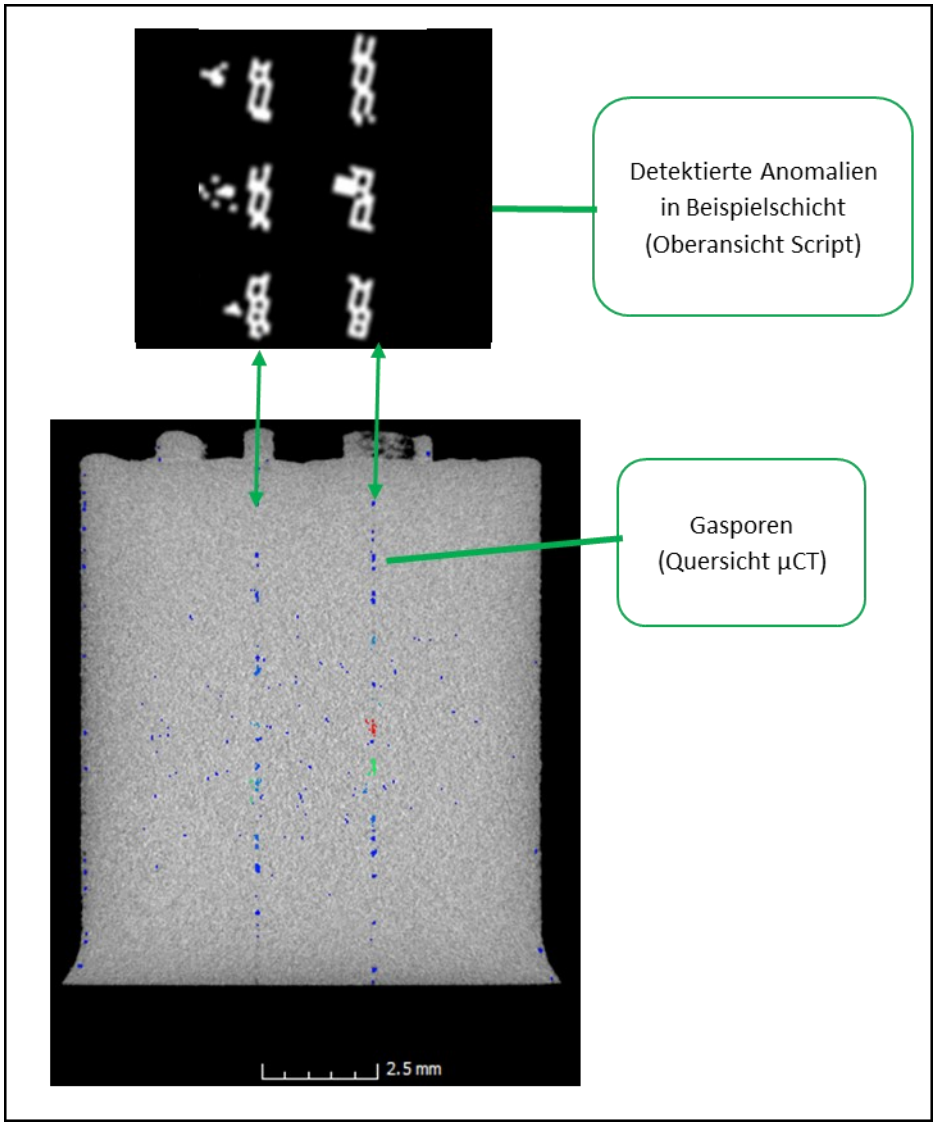
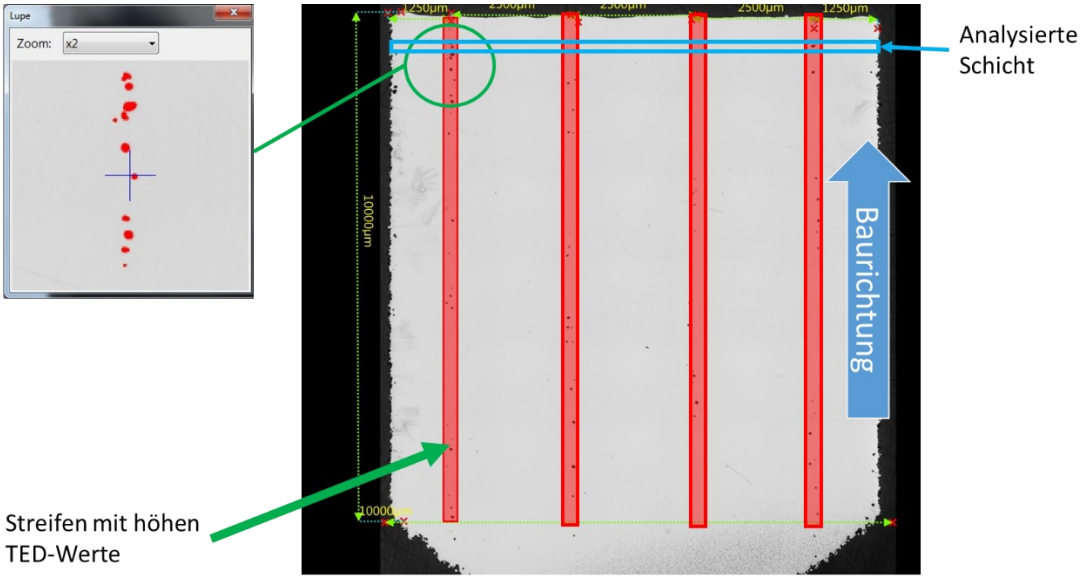


Abbildung 2-35 Korrelation zwischen Anomalien und µCT-Scan

Die Defektdetektion des Algorithmus wurde anhand einer Wahrheitsmatrix bewertet. Die Werte der Qualitätsmetrik TED wurde mit der berechneten Porosität der Schliffbilder verglichen. Ein Schliffbild jeder Probekörper mit Überhitzung an den Streifengrenzen wurde analysiert. Die Anzahl der auftretenden Gasporen an den Streifengrenzen wurden gezählt.



Es ist wichtig zu erwähnen, dass sich die Gasporen stochastisch bilden und nicht in jeder Schicht auftreten, obwohl die Prozessbedingungen die Porenbildung fördern. Die Kriterien der Wahrheitsmatrix wurden in der Tabelle unten gezeigt:

Testkriterien	Anzahl der porösen Schichten	
	>1%	>10%
TED Wert	>8000	>15000

Die Wahrheitsmatrizen befinden sich unten:

TED™ & >10% Porosität		Vorhersage	
#Messwerte (N)	62	Schlecht	Gut
Ist	Schlecht	3	2
	Gut	5	52
Genauigkeit	0.89	Fehlkassifizierung	0.11

TED™ & >1% Porosität		Vorhersage	
#Messwerte (N)	15	Schlecht	Gut
Ist	Schlecht	50	0
	Gut	12	0
Genauigkeit	0.81	Fehlkassifizierung	0.19

Die Matrizen zeigen, dass der Algorithmus Schichten mit einer Porosität höher als 10 % mit 89 % Genauigkeit und Schichten mit einer Porosität höher als 1 % mit 81 % Genauigkeit erkennen konnte.

2.3.4.3.2 Detektion von Lack-of-Fusion-Porosität

Eine starke Korrelation zwischen der Anzahl der mit dem Algorithmus detektierten Anomalien und die Lack-of-fusion Porosität in den Probekörpern wurde festgestellt. Die Porosität in den Probekörpern wurde mit Hilfe von Schliffbildern bestimmt.

Erkennung von „Flecken“ die Temperaturabweichungen zeigen. Diese korrelieren mit Instabilitäten beim Schmelzprozes, die zu LoF Porosität führen.

Das kommerzielle Prozessüberwachungssystem zeigte Bereiche wo die Qualitätsmetrik „TEP-Sigma“ besonders hoch war, das war ein Indiz für Instabilitäten in der Temperatur des Schmelzbades. Diese Instabilitäten waren ein Hinweis für Lack-of-Fusion aufgrund von Spritzen, weil diese Partikel ein größeres Teil der Laserenergie als die Pulverpartikel während des Schmelzprozesses absorbieren und Schwankungen in der Prozesstemperatur verursachen.

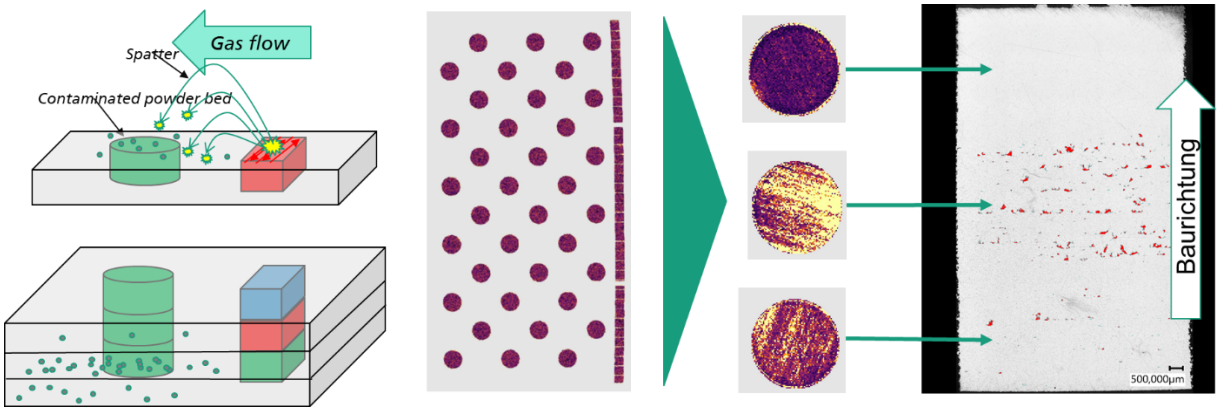


Abbildung 2-36 Messwerte für TEP Sigma korrelieren mit der Porenbildung

Der Algorithmus zur Auswertung der thermischen Emissionen in den monochromen Bildern wurde zur automatischen Erkennung der Prozessabweichungen, die lack-of-Fusion-Porosität verursachen, eingesetzt. Wie oben beschrieben, wurde die Qualitätsmetrik TEP Sigma hauptsächlich verwendet. Die relative Anzahl der Anomalien, die auf jeder Schicht identifiziert wurden, korrelierte mit der Porosität der Probekörper (sieh unten).

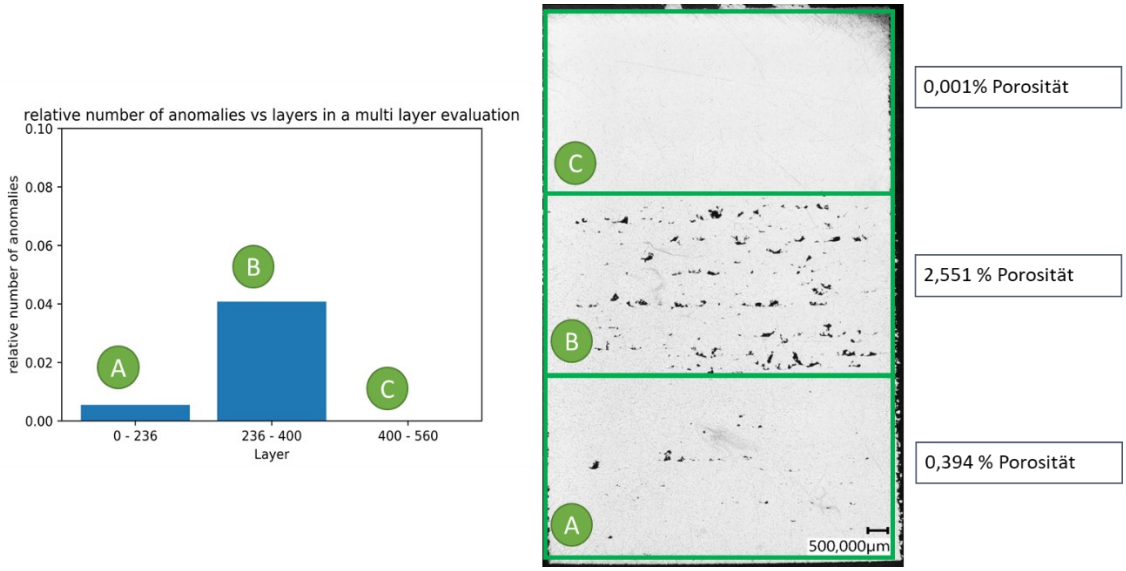


Abbildung 2-37 Relative Anzahl von Prozessabweichungen in den Bereichen A,B,C (links) und Porositäts-analyse (rechts)

Ein weiterer Schritt in der Entwicklung von Auswertungsmethoden ist die Clustering und Klassifizierung aus Basis der Textur von Schichten mit local binary pattern Histogrammen. Das Input zur Texturanalyse waren die monochromen Bilder der Qualitätsmetrik „TEP-Sigma“ des SigmaLabs-Systems. Die Texturen der Bilder wurden in neun Bins für gleichmäßige Muster und ein Bin für ungleichmäßige Muster eingeordnet.

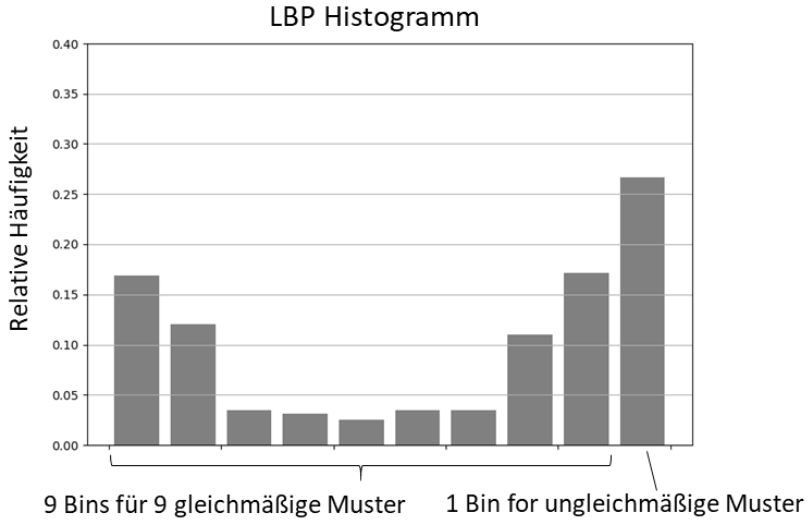
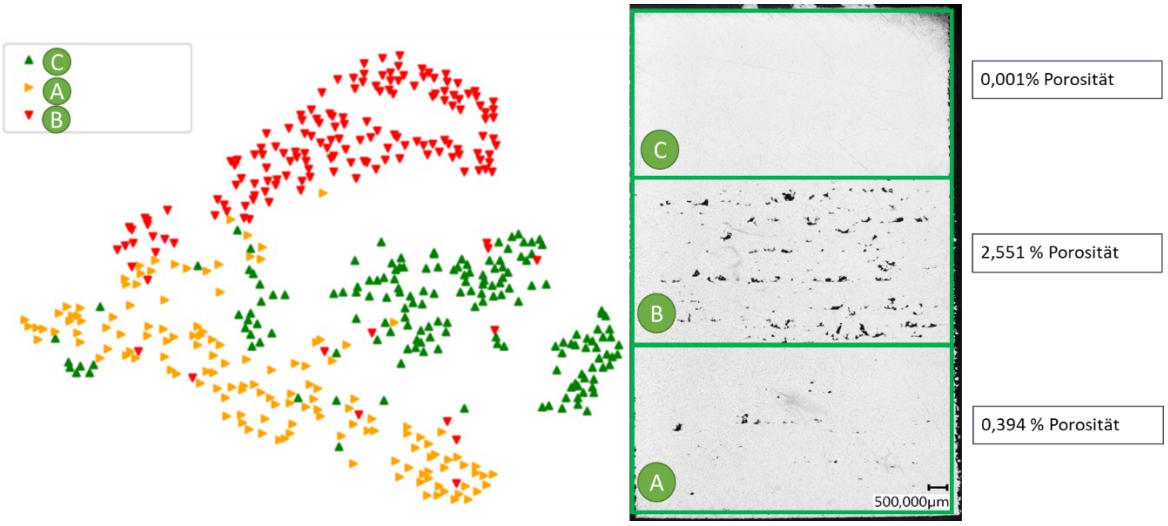


Abbildung 2-38 LBP Histogramm der Klassifizierung der Muster des Qualitätsmaßes TEP-Sigma

Anschließend wurde eine t-SNE Dimensionsreduktion für eine weitere Klassifizierung der Texturen durchgeführt. Die Dimensionsreduktion ermöglicht die Identifizierung von drei unterschiedlichen Bereichen in den Daten, die mit den Porositätszonen im Schliffbild des Probekörpers korreliert.



2.4. Regelung

Im Teilprojekt "Echtzeitregelung mit integrierten Sensoren und intelligenten Methoden" liegt das besondere Augenmerk auf der Geschwindigkeit und Adaptierbarkeit der Sensorik und Regelung. Die Messdaten werden mit temporalen Sensormodellen ausgewertet und in adaptierbaren Regelungsmodellen werden die Stellgrößen zur Fehlervermeidung adaptiert. Es kommen dabei Methoden aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz zum Einsatz.

2.4.1 Aufbau

In Abbildung 2-39 ist der grundsätzliche Regelkreis für den Laserschmelzprozess abgebildet.

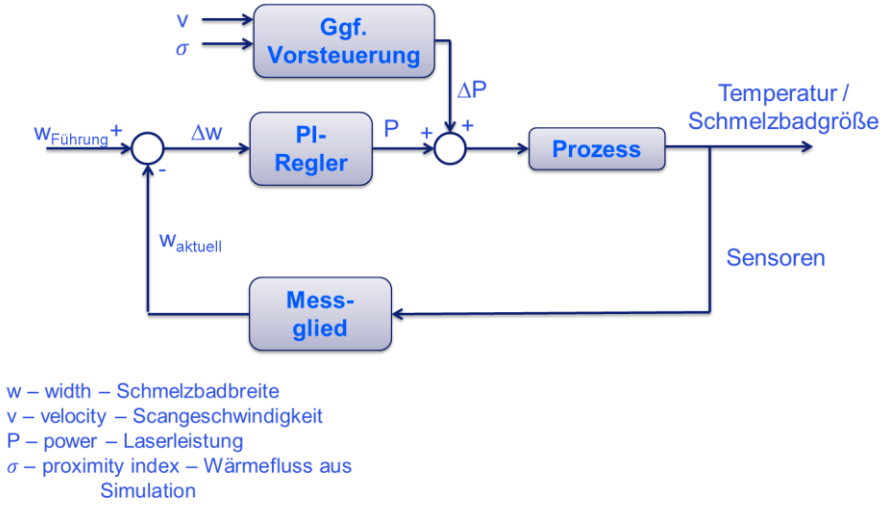


Abbildung 2-39 Grundsätzlicher Regelkreis mit PI-Regler

Gemäß den Anforderungen an die Regelung sollen als Alternative zum PI-Regler auch weitergehende adaptive Regelstrukturen betrachtet werden. Für die hohe Regelgeschwindigkeit erscheint eine FPGA-Hardware mit der Software Quartus eine mögliche praktikable Lösung zu sein. Dort ist es möglich, Hardware-Gatter zu programmieren, so dass eine stark an die Problemstellung angepasste parallel bearbeitbare Steuerung realisiert werden kann, die

individuelle Funktionalitäten in Zykluszeiten unter 1 µs umsetzen kann. In Abbildung 2-40 ist der Workflow der Programmierung dargestellt.

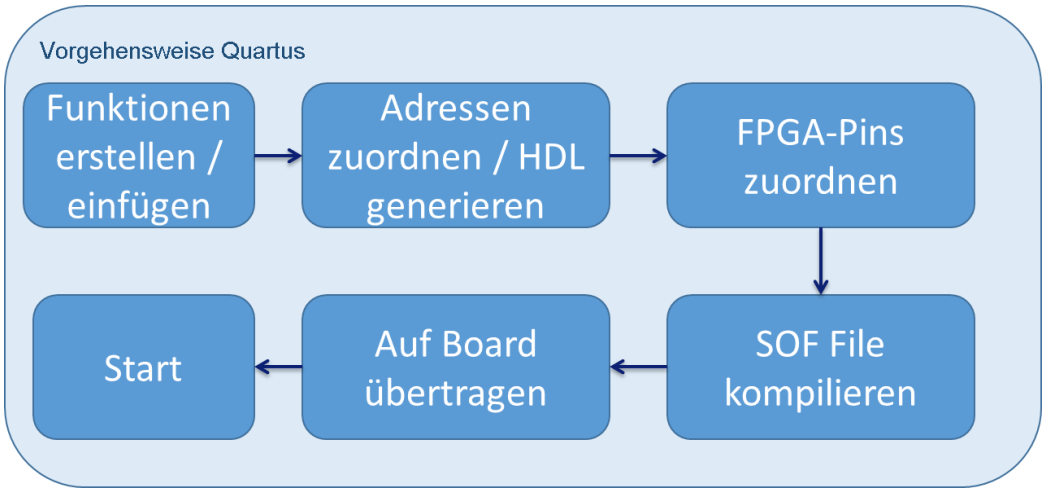


Abbildung 2-40 Vorgehensweise FPGA-Programmierung

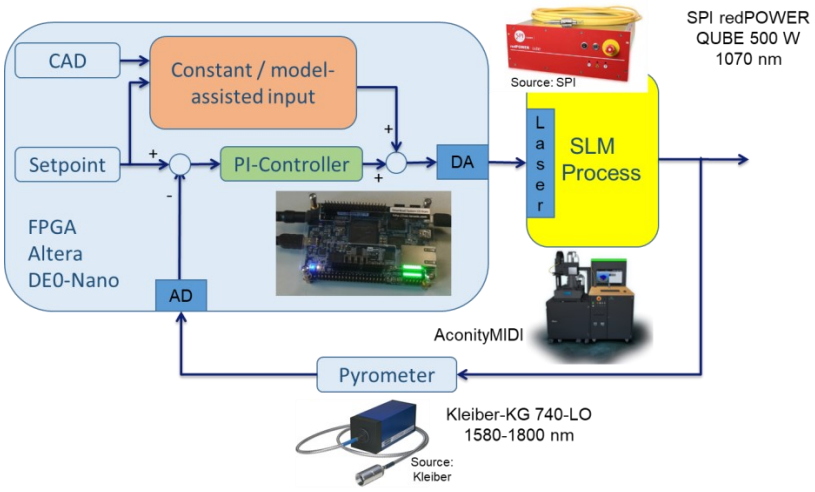


Abbildung 2-41 Geschlossener Regelkreis

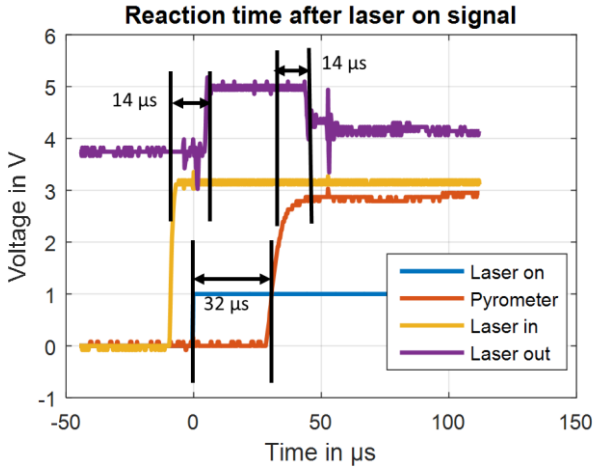


Abbildung 2-42 Zeitanalysen der Regelzeit im geschlossenen Regelkreis

Eine In-Prozess-Regelung konnte anhand eines auf Field Programmable Gate Arrays (FPGA) basierenden Steuerungssystems realisiert werden, um den Regelkreis zwischen Pyrometermessung und Stellung der Laserleistung zu schließen (Abbildung 2-42). Hier konnten Regelzeiten von 50 µs realisiert werden (Abbildung 2-42), die eine Anwendbarkeit des Reglers auch bei den vorkommenden Scangeschwindigkeiten von etwa 1000 mm/s zeigt.

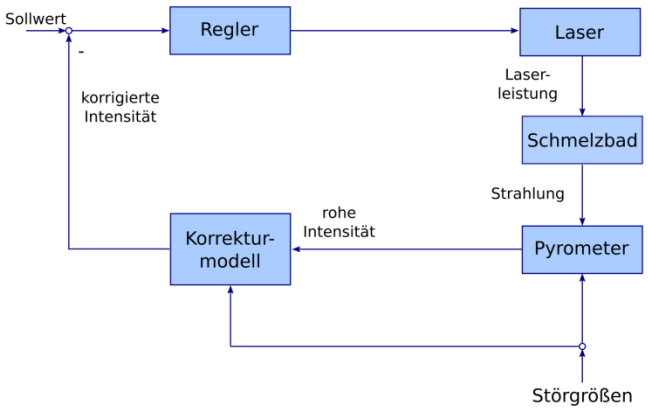


Abbildung 2-43 Anwendung eines Korrekturmodell

Die in AP 4 gezeigten Querempfindlichkeiten stellen eine besondere Herausforderung an die Regelung des Prozesses dar. Daher ist es zielführend, bekannte systematische Einflüsse in die Modellbildung und in die Regelung zu integrieren.

In Abbildung 2-43 ist der Korrekturansatz gegeben, der aus dem Rohwert der gemessenen Intensität und Beachtung der bekannten Störgröße Scanrichtung eine korrigierte Intensität berechnet. Deren Regelabweichung wird dann ihrerseits auf den Reglereingang geschaltet, um die Laserleistung zu bestimmen. Ein weiterer Ansatz besteht in der Verwendung von Bayes-Netzen zur Korrektur des Messsignals.

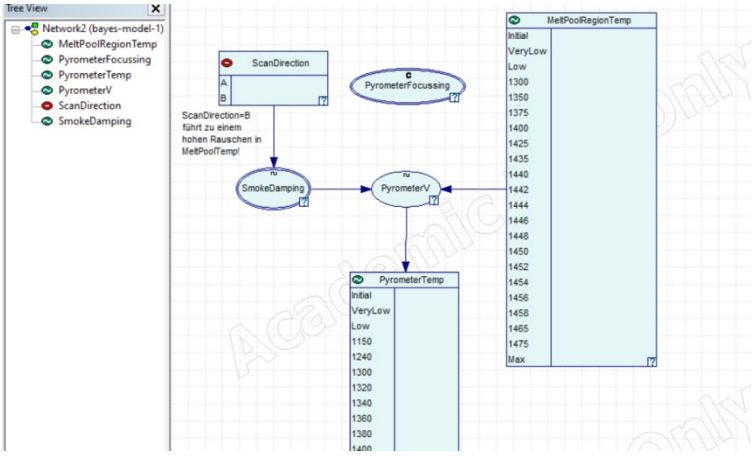


Abbildung 2-44 Umsetzung eines Bayes-Netzes mit dem Software-Werkzeug GeNIe / SMILE

Wie in Abbildung 2-44 dargestellt werden in den Netzwerkknoten des Bayes-Netzes Funktionen und Berechnungen durchgeführt, die in einem Sampling-Prozess Wahrscheinlichkeitsverteilungen in den Ausgangsknoten erzeugen. So wird in dem gegebenen Beispiel modelliert, dass durch die Scanrichtung eine Signaldämpfung von 20 % gegeben ist, wodurch die gemessene Pyrometerspannung entsprechend angepasst wird und somit einen Einfluss auf den Ausgabeparameter Schmelzbadtemperatur aufweist. Weiterhin kann durch die Angabe der Verteilung auch eine Standardabweichung des Signals angegeben werden. Das grafisch erzeugte Modell kann dann als .xml-Datei gespeichert werden und in eine C++ integriert werden. Nach einem Kompiliervorgang wird das Programm in einem Linux-Betriebssystem zur Anwendung gebracht. Als Schnittstelle zum FPGA-basierten Regler des Prozesses dient dann ein Shared-Memory-Bereich auf der Regler-Hardware. Der Regler selber wird als digitaler P- oder PI-Regler in VHDL programmiert.

2.4.2 Integration

Im Rahmen von Validierungsversuchen wurden verschiedene Regelungsstrategien getestet. Es konnte aufgezeigt werden, dass bei Anwendung eines Reglers bei einem prinzipiellen Brückenversuch mit geringerer Geschwindigkeit von 10 mm/s und ohne Pulver die Standardabweichung des Pyrometersignals um etwa 70 % gesenkt werden kann (Abbildung 2-45). Beim Aufbau von Würfel und Dreiecksbauteilen unter realistischen Prozessbedingungen kann die Standardabweichung um etwa 25 % reduziert werden (Abbildung 2-46).

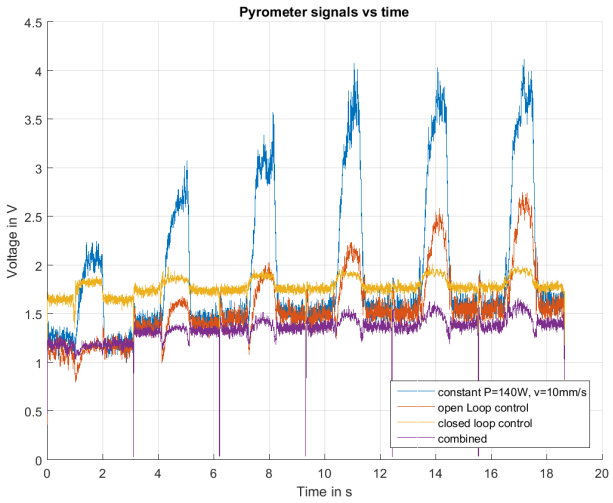


Abbildung 2-45 Pyrometerwerte bei verschiedenen Regelstrategien

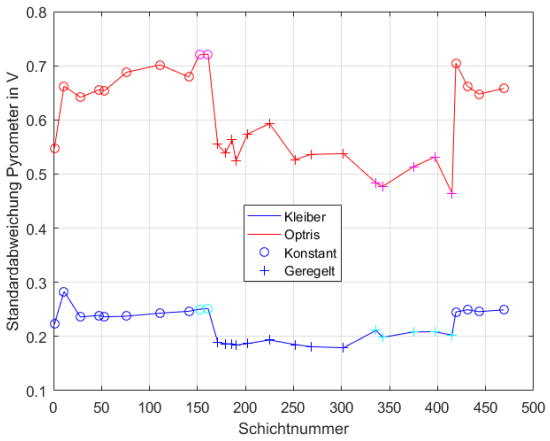


Abbildung 2-46 Reduzierung der Standardabweichung bei Einsatz des Reglers im Vergleich zur Steuerung mit konstanter Laserleistung

Für die Validierung wurde ein Aufbauversuch mit vergleichbaren Randbedingungen bezüglich Scanrichtung, Position und Hatchversatzrichtung designet. Daher wurden Brückenbauteile mit quadratischen Basiselementen und einer Brückendistanz von 6,4 mm in identischer Ausrichtung in Dreiergruppen im Bauraum verteilt (siehe Abbildung 2-47). Für die einzelnen Bauteile wurden die Vektoren gezählt, so dass die Übergänge im VHDL-Code genau bekannt sind und der Regler von P-Modus in konstanten Steuerungsmodus und schließlich in PI-Modus vektorgenau umgeschaltet wurde.

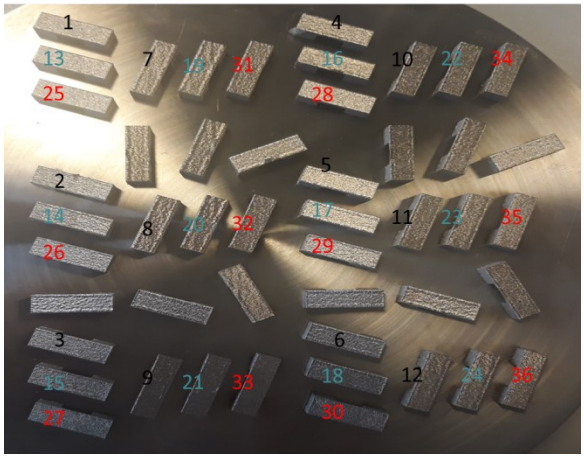


Abbildung 2-47 Kombinationsversuch von Brückenbauteilen mit P-Regler (schwarz), Steuerung (blau) und PI-Regler (rot).

Bei den unterschiedlichen Belichtungsstrategien kann man in Abbildung 2-48 die Unterschiede klar erkennen. Der P-Regler oben links reduziert im Vergleich zu der Steuerung oben rechts die Standardabweichung des Pyrometersignals von 0,19 V auf 0,15 V. Es ist jedoch erwartungsgemäß eine bleibende Regelabweichung zu erkennen. So liegt der Mittelwert vom ersten Vektor und vom dritten Vektor oberhalb von 1,2 V während der zweite und der vierte Vektor Werte unterhalb von 1,2 V aufweisen. Diese Abweichung ist wie auch schon in AP 2 andiskutiert auf eine Richtungsabhängigkeit des Pyrometers zurückzuführen. Durch Hinzuschalten eines I-Anteils links unten kann diese bleibende Regelabweichung im Mittel auf 0 V reduziert werden. Hierzu erhöht der PI-Regler das „Laser out“ durch den Integrator von 3,8 V auf 4,0 V für die geraden Vektoren. Weiterhin zeigten sich bei dem Versuch folgende Auffälligkeiten:

- Regelung in erster Brückenschicht kontraproduktiv

- Regelung im weiteren Verlauf führt zu einer Fehlerabmilderung
- PI-Regler besser geeignet als P-Regler trotz höherer Standardabweichung im Messsignal

Parameter für P-Anteil (kp) und I-Anteil (Ti) müssen gut gewählt sein.

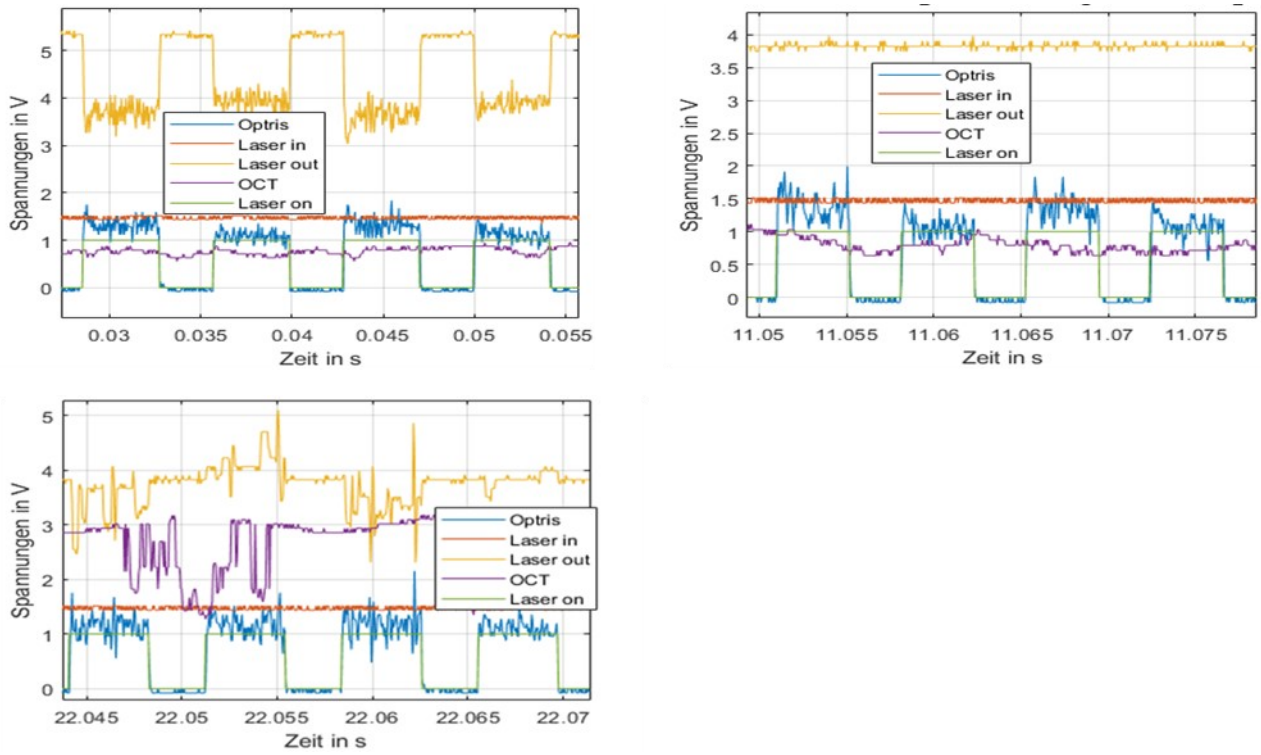


Abbildung 2-48 Vergleich von vier Vektoren unter Belichtung mit P-Regler (links oben), Konstant-Steuerung (rechts oben) und PI-Regler (links unten)

2.4.3 Rückkopplung der Messergebnisse auf Produktentstehungsprozess

In Kooperation mit den Projektpartnern wurden Probekörper und Demonstrations-Bauprozesse definiert, um verschiedene Prozessfehler zu provozieren (vgl. 2.3.1) und die zugehörigen Messwerte der Sensoren zu erfassen. Zur Auswertung der in diesen Bauprozessen gesammelten Messdaten wurden Anzeigeprogramme entwickelt, die eine interaktive Prüfung der Messwerte auf Schichtdatenebene erlauben (Abbildung 2-49).

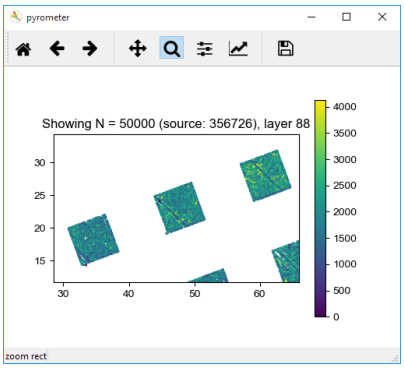


Abbildung 2-49 Beispiel für Anzeige von Pyrometer-Messdaten für eine Schicht.

Für die Auswertung wurden die über Ort und Zeit referenzierten Messdaten mit den Baudaten (Vektoren und Scanparameter) verknüpft, um so eine direkte Rückkopplung der Messergebnisse auf die Datenaufbereitung zu ermöglichen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde die synchrone Aufzeichnung von Messwerten und Scannerposition als großer Vorteil und Alleinstellungsmerkmal der Materialise Control Platform identifiziert.

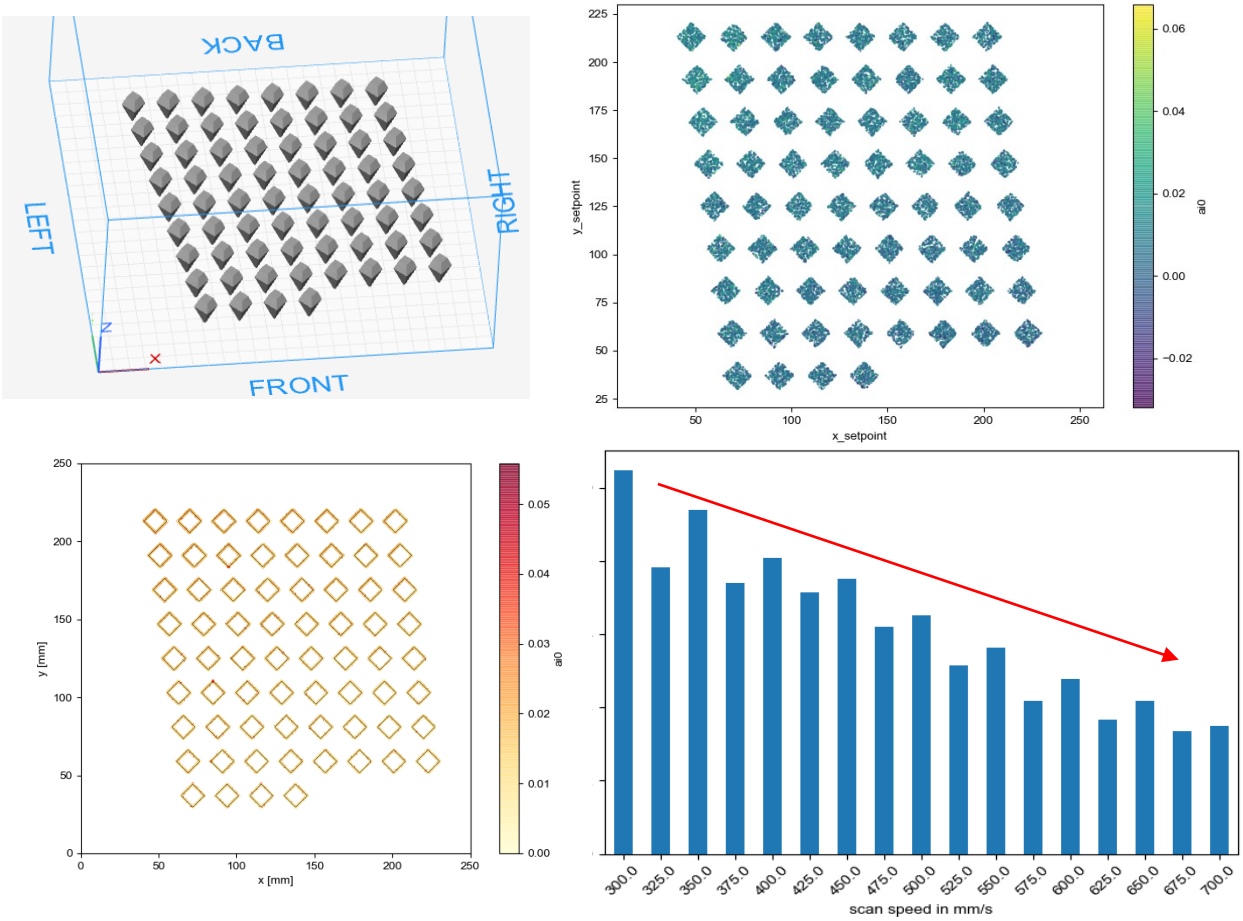


Abbildung 2-50 Rückkopplung der Messergebnisse: bei der Testplattform (oben links) wurde die Scangeschwindigkeit der Konturbelichtung systematisch variiert, aus den Messwerten des Pyrometers (oben rechts) lassen sich per Verknüpfung mit den Baudaten (Vektoren) die Messwerte der Konturverktoren extrahieren (unten rechts) und geordnet auswerten, hier exemplarisch über der Scangeschwindigkeit (unten rechts).

2.5. Job- und Defekt-Datenbank

2.5.1 Prozessmodellierung

Die Archivierung von Baudaten aus der Datenvorbereitung, sowie die Erfassung von Messdaten der integrierten Sensoren und detektierter Prozessfehler setzt eine geeignete Struktur/Modellierung des Prozesses voraus. Hierfür wurde von BIMAQ, ISRA Vision AG und Materialise GmbH gemeinsam eine Abbildung der Prozesskette erarbeitet.

Das Modell folgt hierbei der Datenaufbereitung für den 3D-Druck (Abbildung 2-51): eine vom Anwender/Kunden bereitgestellte *Geometrie* wird in der Datenvorbereitung orientiert und mit Stützstrukturen versehen und hiermit zum *Produkt.* Bei Bestellung der Geometrie wird das *Produkt* auf einer Bauplattform platziert, die resultierende *Szene* enthält ein oder mehrere *Produkte*. Für den tatsächlichen Druck wird die *Szene* vom Build Processor in Schichtdaten aufgeteilt und die Scanpfade werden berechnet. Diese Daten definieren den *Job*, der nun ein- oder mehrfach von einem passenden 3D-Drucker produziert werden kann. Jeder

Bauprozess wird als eine *Bau*-Instanz archiviert. Treten bei einem Bauprozess Fehler auf, werden diese als einzelne Defekte abgelegt und der *Bau*-Instanz zugeordnet.

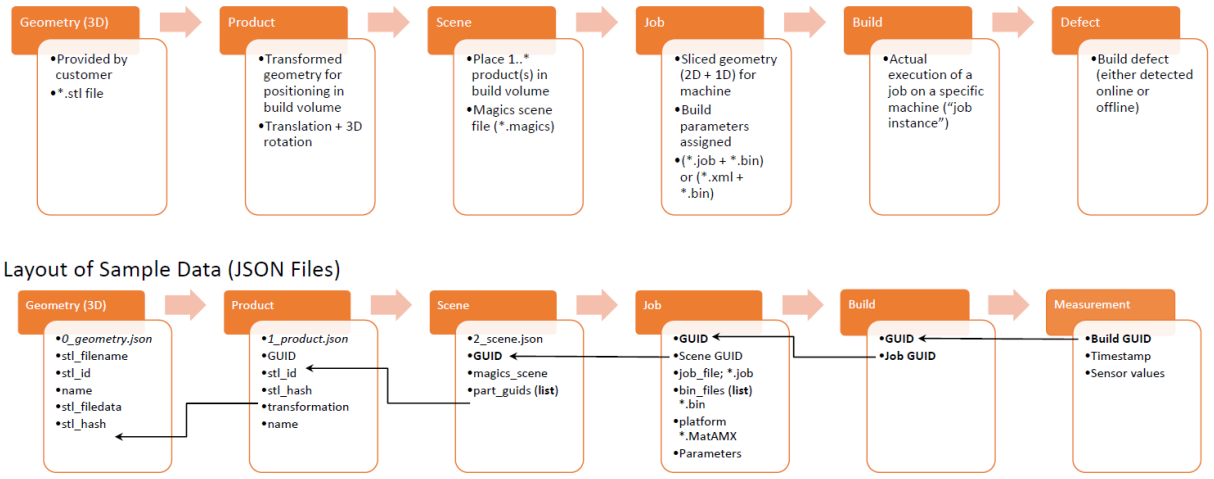


Abbildung 2-51 Abbildung der Prozesskette auf Entitäten für Archivierung (oben), Verknüpfung der Datenobjekte für die Übermittlung in mehreren Nachrichten zur Datenbank (unten).

2.5.2 Implementierung

Zur Anbindung unterschiedlicher Sensorik in den Gesamtprozess wurde eine möglichst vereinheitlichte Schnittstelle konzipiert und prototypisch umgesetzt. Ziele dieses Teilprojekts waren:

- Customer Separation
- End-to-End Security
- Data Transport Layer Encryption
- Redundancies in Storage and Communication
- Cover Security Updates
- Communicate through Firewalls
- User and Data Privacy
- License Management
- Use communication Buffers

Folgende Abbildung zeigt die schematische Darstellung der Anbindung von Sensorik an den InSensa Prozess. Um möglichst agnostisch gegenüber der Sensor-Daten und Sensor-Steuerung zu sein, wurde auf spezielle Datenmodelle verzichtet und der Transport als JSON / JSON binary umgesetzt.

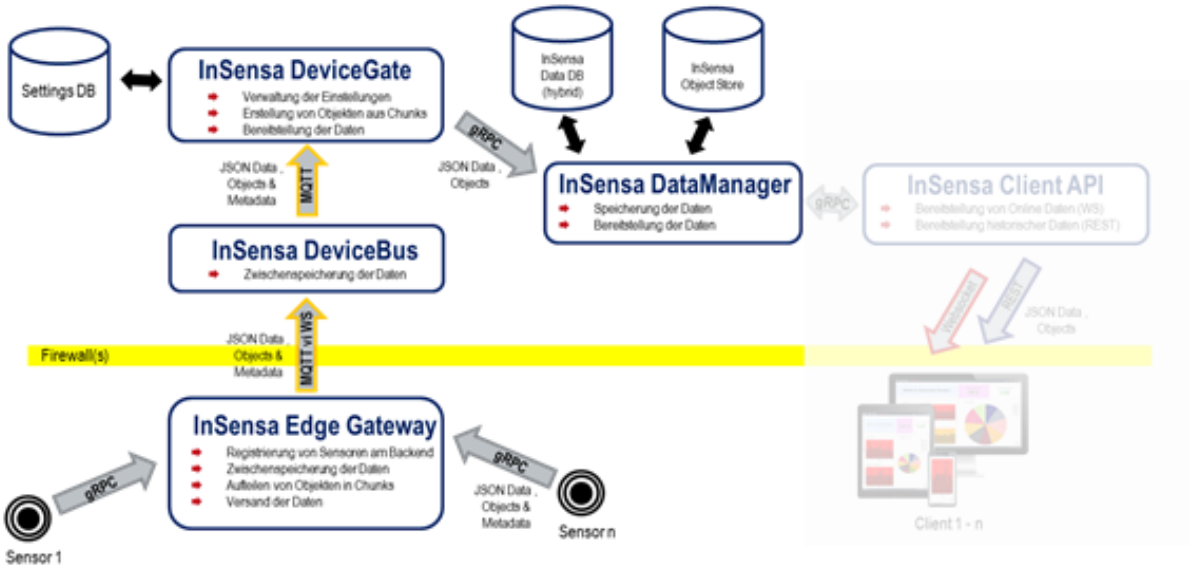


Abbildung 2-52 Schematische Darstellung der Sensor-Anbindung

Auf Implementierungsebene werden die Metadaten im JSON-Format übergeben, um die Durchsuchbarkeit bei einer Datenbankabfrage zu gewährleisten, während die zugehörigen Binärdaten (proprietäre Formate) als Binärblob archiviert werden. Um die Identifizierbarkeit von *Geometrien* sicherzustellen, wird ein Hash-Wert der bereitgestellten Meshdaten (STL-Format) berechnet und für die Referenzierung genutzt. Die Zuordnung der weiteren Instanzen entlang der Prozesskette erfolgt über zufällig generierte Bezeichner (globally unique identifier, GUID).

Basierend auf der Prozessmodellierung aus Abbildung 2-51 erfolgte die Entwicklung der Datenbankstruktur bzw. des Backends zur Archivierung der Bau- und Defektdaten.

Zur Validierung der Anwendbarkeit des entwickelten Konzepts zur Datenerfassung wurde eine Schnittstelle zwischen Materialise Control Platform und Datenbankinstanz auf dem Edge-PC implementiert (Abbildung 2-53). Hier erfolgt die Übersetzung der Inhalte in die im Protokoll definierten Text- und Binärformate.

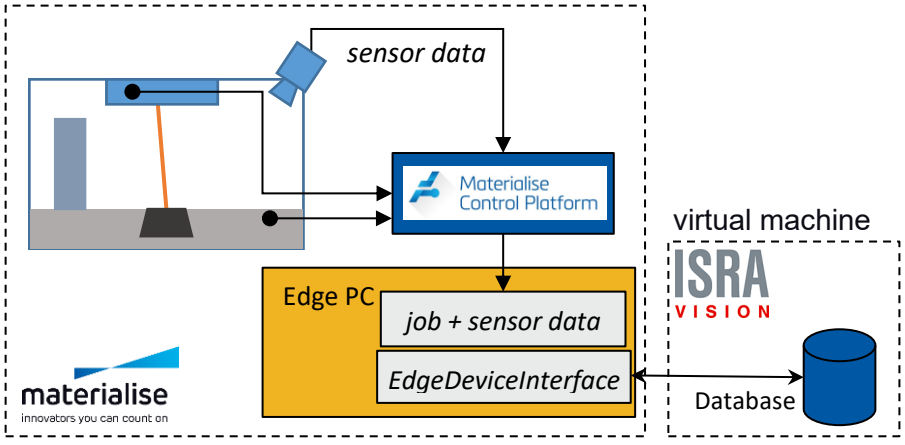


Abbildung 2-53 Übertragung der erfassten Sensordaten an die Datenbankinstanz.

Die implementierte Client-API zur Sensor-Anbindung setzt folgende Funktionalitäten um:

- Abfragen „Historischer Daten“ per REST (Request/Response)
- Stream von „Online Daten“ per Websocket
- Authentication (z.B. über JWT Tokens, Clientside SSL/TLS, etc.)
- Authorization (Integration eines Usermanagements)

Zusätzlich wurde eine Client SPA Anwendung implementiert zur:

- Visualisierung von „Online Daten“
- Visualisierung aggregierter „historischer Daten“

3 Ausblick

Anhand der Ergebnisse der durchgeführten Arbeiten wurden weitere Herausforderungen identifiziert, die in zukünftigen Forschungsarbeiten berücksichtigt werden sollten.

Die Auswertung des Einflusses der Regelung auf unterschiedliche Bauteileigenschaften hat gezeigt, dass im Bereich der additiven Fertigung mittels PBF-LB/M der Begriff der Bauteil-*qualität* mit den unterschiedlichsten Definitionen und Konnotationen verwendet wird. Für die Optimierung des Fertigungsprozesses und die passende Parametrisierung einer Prozessregelung müssen die Anforderungen daher bauteil-/anwendungsspezifisch und lokal definiert werden (Abbildung 3-1). Hier fehlt es aktuell noch an Methoden zur Definition der lokalen Anforderungen und deren Umsetzung entlang der (digitalen) Produktionskette.

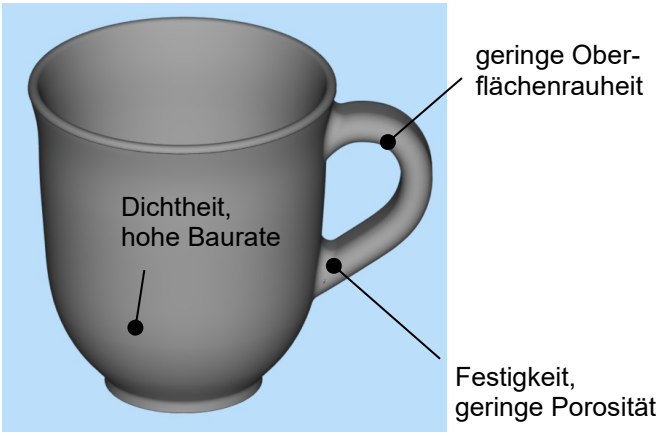


Abbildung 3-1 Beispiel für lokale Anforderungen bei Bauteilen. (Quelle 3D-Geometrie: barspin, www.thingiverse.com/thing:159884)

Bei Arbeiten im Zusammenhang mit Prozessregelung stellt sich die grundsätzliche Frage, inwieweit ähnliche Ergebnisse für komplizierte Geometrien auch durch eine Voroptimierung („open loop“) anstelle einer Regelung im Prozess erzielt werden können. Hier haben die Untersuchungen zur simulationsgesteuerten Regelung gezeigt, dass die Berücksichtigung der (vorab bekannten) Geometrie die Einstellung der Prozessparameter deutlich erleichtert. Ein erweiterter Vergleich der Bauteileigenschaften bei lokal optimierten Prozessparametern und geregelten Bauprozessen erscheint sinnvoll.

Im Bereich regulierter Anwendungen wie sie z.B. in sicherheitsrelevanten Industrien und der Medizintechnik vorkommen, stellt sich beim Einsatz einer Prozessregelung die Frage, ob die Stärke des Eingriffs durch die Regelung begrenzt werden muss, um den Bereich des zertifizierten Prozesses nicht zu verlassen. Der Einsatz von Software zur Prozessregelung könnte bei einigen Anwendungen im Bereich der Medizintechnik dazu führen, dass die Software gemäß den Anforderungen für Medizinprodukte entwickelt werden müsste.

Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Arbeiten und Experimente haben die Bedeutung von offenen Schnittstellen für PBF-LB/M-Anlagen deutlich gemacht. Ohne diese wären weder Sensorintegration, noch Integration der Regelung möglich gewesen. Die anfallenden Daten aus den unterschiedlichen Bereichen des Bauprozesses müssen für eine umfassende Prozessüberwachung und -optimierung auch über proprietäre System hinaus zugänglich und nutzbar sein. In diesem Bereich wären auch weiterführende Untersuchungen oder Standardisierungsansätze denkbar.

4 Zusammenfassung

Das Ziel des Forschungsvorhabens InSensa war die Erfassung und Vermeidung von Fehlern in der pulverbettbasierten additiven Fertigung von Metallbauteilen mittels Laser (PBF-LB/M) durch die Integration von Sensor- und Regelungstechnik.

Als Ausgangspunkt der Arbeiten wurde vom Konsortium ein Fehlerkatalog mit Definitionen der Prozessfehler, sowie der möglichen Detektierbarkeit durch verschiedene Sensormodalitäten zusammengestellt (Abschnitt 2.1). Basierend auf den Erfahrungen der AM-Anwender wurden die Fehler priorisiert, um die schwerwiegenden und häufigen Fehler bei der Entwicklung bevorzugt zu berücksichtigen. Zusätzlich wurden Demonstratorbauteile und -prozesse entworfen, um die ausgewählten Fehlerbilder gezielt zu provozieren (Abschnitt 2.3.1).

Die Positionierung der Sensoren erfolgte sowohl koaxial („on-axis“), zur unmittelbaren Beobachtung des Schmelzbads, als auch „off-axis“ zur Überwachung ganzer Bauteile/Bauteilregionen und der Prüfung der aktuellen Schicht nach dem Aufschmelzvorgang (Abschnitt 2.2.1). Zur Schmelzbadüberwachung wurde ein neues Hochgeschwindigkeits-Pyrometer mit einer Messfrequenz von 100 kHz entwickelt (Abschnitt 2.2.2), eine Thermographie-Kamera prozessspezifisch angepasst (Abschnitt 2.2.3) und ein OCT-Topographiesensor mit neuer Wellenlänge zur Optimierung der Abbildungseigenschaften in PBF-LB/M-Anlagen entwickelt (Abschnitt 2.2.5). Für die Überwachung von Bauteilregionen/ganzen Schichten wurde ein 3D-Kamerasystem (Multiview-Stereo) auf vier Kameras erweitert und angepasst, um auch glänzend reflektierende Oberflächen dreidimensional zu erfassen (Abschnitt 2.2.4).

Die Integration der Sensoren in die verwendeten Versuchsanlagen wurde erfolgreich abgeschlossen, das 3D-Kamerasystem konnte aufgrund von Produktionsverzögerungen nur prototypisch erprobt werden. Hierbei konnten erfolgreich mehrere koaxiale Sensoren kombiniert werden und so eine multimodale Prozessüberwachung realisiert werden. Basierend auf der Auswertung von Bauprozessen mit provozierten Prozessfehlern wurde in mehreren Runden eine umfassende Bewertung der Sensormodalitäten erstellt, die sowohl das Potential als auch die Schwierigkeiten des Sensoreinsatzes zusammenfasst (Abschnitt 2.2.6).

Ein Datenbanksystem zur Dokumentation der Daten aus der Bauvorbereitung und der Prozessüberwachung sowie der nachträglichen Analyse aufgetretener Fehler wurde spezifiziert und prototypisch umgesetzt (Abschnitt 2.5). Die gesammelten Messdaten für provozierte Prozessfehler wurden genutzt, um Ansätze zur automatischen Fehlerdetektion zu evaluieren (Abschnitt 2.3.4).

Nach erfolgreicher Integration der koaxialen Sensoren wurde die Echtzeit-Prozessregelung der Laserleistung basierend auf dem Messwert des Pyrometers angebunden und die Verzögerung des Regelungssystems untersucht (Abschnitt 2.4). Es erreicht eine Regelzeit von 50 µs und ist somit für in der Praxis übliche Scangeschwindigkeiten in der Größenordnung von 1000 mm/s geeignet. Nach ersten Funktionstests mit niedrigen Scangeschwindigkeiten wurde der Einfluss der Regelung auf die Bauteilqualität, insbesondere im Bereich von Überhangregionen untersucht. Hierbei wurde gezeigt, dass bei Einsatz eines PI-Reglers die gemittelte Oberflächenrauheit von Brückengeometrien um 20 % reduziert wird.

Das Projektkonsortium konnte die angestrebten Entwicklungen (neue Sensorsysteme und Prozessregelung) erfolgreich abschließen und eine Bewertung des Zusatznutzens erarbeiten. Eine automatische Fehlerdetektion konnte nicht entwickelt werden, aber die Vorarbeiten und Prioritäten für eine zukünftige Bearbeitung wurden geschaffen.

5 Anhang

5.1. Veröffentlichungen

1. V. Renken, L. Lübbert, H. Blom, A. von Freyberg, A. Fischer: Model assisted closed-loop control strategy for selective laser melting. 10th CIRP Conference on Photonic Technologies (LANE 2018), Fürth, 3.-6.9.2018. Procedia CIRP 74:659-663, 2018.
2. V. Renken, A. Fischer: Fehlerreduktion in der additiven Fertigung durch Sensorintegration und eine adaptive Regelungsstrategie. Workshop "Qualitätssicherung und Messtechnik in der Additiven Fertigung", Jena, 8.3.2018.
3. V. Renken, A. von Freyberg, K. Schünemann, F. Pastors, A. Fischer: In-process closed-loop control for stabilising the melt pool temperature in selective laser melting. Progress in Additive Manufacturing 4(4):411-421, 2019. doi.org/10.1007/s40964-019-00083-9
4. V. Renken, D. Gleichauf, F. Pastors, L. Lübbert, A. von Freyberg, A. Fischer: Reducing process variation of laser powder bed fusion by real-time closed-loop control. Lasers in Manufacturing Conference 2019 (LiM), München, 24.-27.6.2019. (4 pp.)
5. J. zur Jacobsmühlen, V. Renken: InSensa - Prozesssensorik und -regelung für die additive Fertigung, BMBF-Abschlussveranstaltung: Additive Fertigung - Individualisierte Produkte, komplexe Massenprodukte, innovative Materialien (ProMat_3D), Frankfurt, 18.9.2019.
6. D. Musekamp: Regelung additver Fertigungsprozesse durch adaptive Modellbildung. Universität Bremen, Fachbereich Produktionstechnik, Bachelorarbeit, 2019
7. J. zur Jacobsmühlen, J. Poppinga: “An Open Control Platform for High Frequency Process Monitoring on an Industrial Laser Powder Bed Fusion Machine,” Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference (DDMC), 2020

5.2. Referenzen

[Ame01] Ament, C.; Goch, G.: A Process Oriented Approach to Automated Quality Control. Annals of the CIRP 50/I (2001), S. 251-254.

[Ast14] ASTM F3049-14: Characterizing Properties of Metal Powders Used for Additive Manufacturing Processes (2014), doi: 10.1520/F3049-14.

[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.

[Ber13] Berger, R.: Additive Manufacturing - A Game Changer for the Manufacturing Industry? (2013).

[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.

[Bra11] Branner, G.: Modellierung transienter Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren, Herbert Utz Verlag (2011).

[Chi04] Childs, T. H. C.; Hauser, C.; Badrossamay, M.: Mapping and Modelling Single Scan Track Formation in Direct Metal Selective Laser Melting, CIRP Annals - Manufacturing Technology (2001), 53(1), pp. 191-194.

[Chi05] Childs, T. H. C.; Hauser, C.; Badrossamay, M.: Selective laser sintering (melting) of stainless and tool steel powders: experiments and modelling, Proc. Inst. Mech. Eng. Part B-J. Eng. Manuf. (2005), 219(4), pp. 339-357.

[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.

[Cra10] Craeghs, T.; Bechmann, F.; Berumen, S.; Kruth, J.-P.: Feedback control of Layerwise Laser Melting using optical sensors. Physics Procedia 5, Part B (2010), S. 505-514.

[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.

[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.

[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.

[Dal14] Dallinger, F.; Roux, E.; Havinga, J.; d'Ippolito, R.; van Tijum, R.; van Ravenswaaij, R.; Hora, P.; van den Boogaard, T.: Adaptive process control strategy for a two-step bending process. In: Sustainable Design and Manufacturing (2014), S. 230-390.

[Das03] Das, S.: Physical aspects of process control in selective laser sintering of metals. Adv Eng Mater 5 (2003), pp. 701–711.

[Day14] Dayal, R.: Numerical Modelling of Processes Governing Selective Laser Sintering. TU Darmstadt, Darmstadt (2014).

[Dör07] Dören, J.: Qualitätsmanagement und Neuronale Netze - ein Ansatz zur prädiktiven Regelung thermischer Spritzprozesse. Fakultät für Maschinenwesen des RWTH Aaachen, Dissertation (2007).

[Els11] Elsen, M. Van: Complexity of Selective Laser Melting: a new optimization approach. Katholieke Universitiet Leuven, Leuven (2007).

[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 aditive 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.

[Eve16] Everton, S.; Hirsch, M.; Stravroulakis, P; Leach, R.; Clare, A.: Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing. Materials and Design 95 (2016), pp. 431–445.

[Föl94] Föllinger, O.: Regelungstechnik. 8. Auflage. Hüttig, Heidelberg, (1994).

[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.

[Gau13] Gausemeier, J.; Dumitrescu, R.; Anacker, H.: A Methodology for the Improvement of Dependability of Self-Optimizing Systems. In: Journal of Production Engineering – Research and Development 7, Nr. 1 (2013).

[Geb12] Gebhardt, A.; Fateri, M.; Hötter, J.-S.; Knothe, M.; Schmidt, F.-M.; Rieper, H.: Numerical and Experimental Investigation of Selective Laser Melting of Silver. Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference, (DDMC) Berlin (2012).

[Gib10] Gibson, I.; Rosen, D. W.; Stucker, B.: Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. Springer (2010).

[Gür13] Gürtler, F. J.; Karg, M.; Leitz, K. H.; and Schmidt, M.: Simulation of Laser Beam Melting of Steel Powders using the Three-Dimensional Volume of Fluid Method. Physics Procedia (2013), 41(0), pp. 881-886.

[Gus07] Gusarov, A. V.; Yadroitsev, I.; Bertrand, P.; Smurov, I.: Heat transfer modelling and stability analysis of selective laser melting. Applied Surface Science (2007), 254(4), pp. 975-979.

[Hav13] Havinga, G. T.; van den Boogaard, T.; Klaseboer, G.: Sequential Optimization of Strip Bending Process Using Multiquadric Radial Basis Function Surrogate Models. In: Key Engineering Materials 554-557 (2013), S. 911-918.

[Hod14] Hodge, N. E.; Ferencz, R. M.; Solberg, J. M.: Implementation of a thermomechanical model for the simulation of selective laser melting. Comput Mech (2014), 54(1), pp. 33-51.

[Jac20] Jacobsmühlen, J., zur; Poppinga, J.: An Open Control Platform for High Frequency Process Monitoring on an Industrial Laser Powder Bed Fusion Machine, Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference (DDMC), 2020

[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.

[Kle12] Kleszczynski, S.; zur Jacobsmühlen, J.; Sehrt, J.T.; Witt, G.: Error detection in laser beam melting systems by high resolution imaging, in: Bourell, D.

(Ed.), Solid Freeform Fabrication: Proceedings, University of Texas at Austin (2012).

[Kle14] Kleszczynski, S.; zur Jacobsmühlen, J.; Reinarz, B.; Sehrt, J. T.; Witt, G.; Merhof, D.: Improving process stability of laser beam melting," Proc. Frauenhofer Direct Digital Manufacturing Converence (DDMC), A. Demmer, ed., Fraunhofer Verlag (2014).

[Kör11] Körner, C.; Attar, E.; and Heinl, P.: Mesoscopic simulation of selective beam melting processes. Journal of Materials Processing Technology (2011), 211(6), pp. 978-987.

[Kra12] Krauss, H.; Eschey, C.; Zäh, M.F.: Thermography for monitoring the selective laser melting process, in: Bourell, D. (Ed.), Solid Freeform Fabrication: Proceedings, University of Texas at Austin (2012).

[Kra14a] Krauss, H.; Zeugner, T.; Zäh, M. F.: Detecting process irregularities in selective laser melting by thermography. Proc. Frauenhofer Direct Digital Manufacturing Converence (DDMC), A. Demmer, ed., Fraunhofer Verlag (2014).

[Kra14b] Krauss, H., Eschey, C. und Zaeh, M.F.: Thermography for Monitoring the Selective

[Kro08] Kroll, A.; Mikut, R.: Computational Intelligence. In: at - Automatisierungstechnik 56, 2008, Nr. 7, Laser Melting Process (2014), S. 335 - 338.

[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.

[Nas15] Nassar, A.R.; Keist, J.S.; Reutzel, E.W.; Spurgeosn, T.J.: Intra-layer closed-loop control of build plan during directed energy additive manufacturing of Ti–6Al–4V, Addit. Manuf. 6 (2015), pp. 39–52.

[Nee14] Neef, A.; Seyda, V.; Herzog, D.; Emmelmann, C.; Schönleber, M.; Kogel-Hollacher, M.: Low Coherence Interferometry in Selective Laser Melting. Physics Procedia 56 (2014), S. 82-89.

[Mir15] Mireles, J.; Terrazas, C.; Gaytan, S. M.; Roberson, D. A.; Wicker, R. B.: Closed-loop automatic feedback control in electron beam melting. Int. J. Adv. Manuf. Technol (2015), 78 (5), pp. 1193–1199.

[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

[Las15] LaserFocusWorld: IDTechEx says metal 3D printer equipment market growing at 48%. URL http://www.laserfocusworld.com/articles/2015/08/idtechex-says-metal-3d-printer-equipment-market-growing-at-48.html (2015).

[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.

[Pfe02] Pfeifer, T.: Quality management - strategies, methods, techniques. Carl Hanser, (2002).

[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.

[Ren13] Renken, V.; von Freyberg, A.; Goch, G.: Potenziale in der Automatisierungstechnik durch Verbindung von speicherprogrammierbaren Steuerungen mit Methoden der künstlichen Intelligenz. In: Angewandte Automatisierungstechnik in Lehre und Entwicklung an Hochschulen (AALE), Stralsund. DIV, Stralsund (2013), ISBN 978-3-8356-3364-3, S. 157-170.

[Ren15] Renken, V.: Modellbasierte Regelung eines Lasergenerierprozesses. In: 49. Regelungstechnisches Kolloquium, Boppard (2015), S. 12-13.

[Pal14] Pal, D.; Patil, N.; Nikoukar, M.; Zeng, K.; Kutty, K. H.; Stucker, B. E.: An Integrated Approach to Cyber-Enabled Additive Manufacturing using Physics based, Coupled Multi-scale Process Modeling. Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings (2014).

[Sch15] Schulz, W.; Khawli, T.: Meta-Modelling Techniques Towards Virtual Production Intelligence. In: Brecher, C. (Hrsg.): Lecture Notes in Pro-duction Engineering, Advances in Production Technology, Springer (2015), S. 69-84.

[Sih93] Sih, S. S.; Barlow, J. W.: The measurement of the thermal properties and absorptances of powders near their melting temperatures. In: 3rd Solid Free. Fabr. Symp. University of Texas at Austin (1993), pp. 131–140.

[SLM14] SLM Solutions: Firmennews vom 16.12.2014. URL http://www.stage.slm-solutions.com/index.php?news-recent_de. (2014).

[Slo14] 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

[Thr05] Thrun, S.; Burgard, W.; Fox, D.: Probabilistic robotics. MIT press (2005), ISBN 0262303809.

[Wir14] Wirtschaftswoche: US-Großauftrag über 3-D-Geräte für bayrische EOS. URL http://www.wiwo.de/unternehmen/industrie/eos-us-grossauftrag-ueber-3-d-geraete-fuer-bayrische-eos/10117404.html. (2014).

[Woh13] Wohlers, T.: Rapid Prototyping & Manufacturing State of the Industry. Annual World-wide Progress Report, Wohlers Associates (2013).

[Xu14] Xu, H.; Keller, N.; Ploshikhin, V.; Prihodovsky, A.; Ilin, A.; Logvinov, R.; Kulikov, A.; Günther, B.; Windfelder, J.; Bechmann, F.: Towards Improved Thermal Management of Laser Beam Melting Processes. Proc. Frauenhofer Direct Digital Manufacturing Converence (DDMC), A. Demmer, ed., Fraunhofer Verlag (2014).

[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.

[Yua07] Yuan, C.; Druzdzel, M. J.: Generalized evidence pre-propagated importance sampling for hybrid Bayesian networks. In: AAAI (2007), ISBN 978-1-57735-323-2, S. 1296-1302.

[Zäh10] Zäh, M. F.; Lutzmann, S.: Modelling and simulation of electron beam melting. Prod. Eng. Res. Devel. (2010), 4(1), pp. 15-23.

[Zen14] Zenzinger, G.; Bamberg, J.; Henkel, B.; Hess, T.; Ladewig, A.: Online Prozesskontrolle bei der additiven Fertigung mittels Laserstrahlschmelzen. ZfP-Zeitung 140 (2014), S. 51.

[Zha14] Zhang, P.; Goch, G.: An in-process quality control concept for laser chemical machining. In: Euspen, Band 2. Dubrovnik (2014), ISBN 978-0-9566790-3-1, S. 408-411.