Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Zum Teilvorhaben:	**Hochtemperatur-Bauraumheizung**
Im Verbundprojekt:	**Intelligent-geregelte additive Prozesskette mittels simulativ und experimentell ermittelten Bauteil-, Werkstoff- und Prozessdaten (ReAddi)**
Zuwendungsempfänger:	**Excelitas Noblelight GmbH als Rechtsnachfolger der Heraeus Noblelight GmbH**
Förderkennzeichen:	**13N15113**
Laufzeit des Vorhabens:	**01.10.2019 - 31.12.2023**

Inhalt

1 Teil I: Kurzbericht 2
2 Teil II: Schlussbericht 4
2.1 Aufgabenstellung 4
2.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 4
2.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 4
2.4 Der Stand von Wissenschaft und Technik 5
2.5 Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse 6
2.5.1 Technische Grundlagen Heizsystem 6
2.5.2 Top Heating 7
2.5.3 Pulvervorheizung 14
2.5.4 Plattformheizung mit Flächenstrahlern (*Bottom-Heating*) 15
2.5.5 Mantelheizung (*Side-Heating*) 16
2.5.6 Befähigung Hardware 17
2.5.7 Temperaturmesstechnik 17
2.5.8 Systematische Untersuchungen 17

1 Teil I: Kurzbericht

Das im Verbundvorhaben definierte Ziel bestand darin, eine prototypische Linienintegration zur Serienfertigung von hybrid additiven Bauteilen in der Automobilindustrie zur Umsetzung zu bringen. Die Materialien der Serienproduktion werden dabei gezielt auf die Bedürfnisse der Automobilindustrie und individuell auf den Anwendungsfall abgestimmt sein. Dazu werden individuelle hochfeste Stahl- und Aluminiumwerkstoffe mit einer reproduzierbaren Pulvercharakteristik von den Pulverherstellern entwickelt.

Bei der Verarbeitung dieser Metallpulvermaterialien im LBM-Prozess ergeben sich jedoch aufgrund der ungleichmäßigen lokalen Aufheizung und Abkühlung der Werkstücke im Pulverbett während des Bauprozesses häufig Spannungsrisse. Ebenso müssen viele Werkstücke nach dem Bauprozess in einem weiteren Prozessschritt temperaturbehandelt werden, um eine Spannungsfreiheit im Material zu gewährleisten. Die Rissentstehung und potentiell auch zusätzliche Wärmebehandlungen lassen sich vermeiden, wenn man während des Bauprozesses definiert hohe Umgebungstemperaturen von ≥500°C einstellt. Um das robuste und zuverlässige Verarbeiten der Pulver in der LBM-Anlage gewährleisten zu können, muss zunächst eine neuartige Bauraumheizung entwickelt und in die Linie integriert werden.

Das Ziel des Teilvorhabens von Heraeus war die Entwicklung und Optimierung einer Hochtemperatur-Bauraumheizung (≥ 500°C) für die im Rahmen des Verbundprojekts verwendete LBM-Maschine LASERTEC 30 SLM von DMG Mori. Die angestrebten Vorteile sind dabei die Verbesserung der Bauteilqualität, das Vermeiden von Spannungsrissen sowie Verarbeitungsmöglichkeiten für neue, auf die Bedürfnisse der Automobilindustrie abgestimmte Werkstoffe mittels Laser-Strahlschmelzen zu ermöglichen. Die Bauraumtemperatur soll idealerweise durch mehrere, sich ergänzende Infrarotsysteme wie beispielsweise Top-Heating, Bauplattformheizung und Pulvervorlagenheizung erzielt werden.

Bisher kommen bei LBM-Anlagen hauptsächlich mittels elektrischer Heizpatronen beheizte Bauplattformen zum Einsatz, mit typischen Heiztemperaturen von ca. 200°C. Die Vorwärm- bzw. Umgebungstemperatur des Werkstücks ergibt sich dann durch Wärmeleitung von unten durch den bereits verfestigten Teil des Werkstücks und das Pulverbett sowie den Energieeintrag des Lasers, sie beträgt oft nur um die 100°C. Das hat bei fortschreitendem Baujob einen starken Temperaturgradienten nach oben hin zur Folge. Das Top-Heating der Pulveroberfläche mittels Infrarotstrahlern ist bei Anlagen für das Laserstrahlsintern von Kunststoffmaterialien bereits etabliert. Im LBM-Bereich kommt Top-Heating bisher jedoch nicht zum Einsatz.

Zu Beginn des Projektes wurden zunächst umfangreiche Raytracing-Simulationen zur Auslegung eines Top-Heating Systems für die LBM-Anlage LT30 von DMG MORI durchgeführt. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Oberfläche des Pulverbetts mittels einer Anordnung von vier Infrarotstrahlern homogen bestrahlt werden kann. Um die Effizienz des Heizsystems zu verbessern und die in die Baukammer abgegebene Infrarotstrahlung zu minimieren, wurde zusätzlich ein Rahmen mit Aluminiumreflektoren entworfen, in den die Infrarotstrahler eingebaut werden können. Da die aktuelle LBM-Anlage jedoch nicht für die zusätzliche thermische Belastung ausgelegt ist, wurde beschlossen, Heizversuche zunächst in einer temperaturstabilen Testanlage (DTM Sinterstation) bei Protiq durchzuführen. Für die Auslegung eines entsprechenden Top-Heating Systems für die runde Bauplattform der Testanlage wurden ebenfalls Raytracing-Simulationen durchgeführt. Anschließend wurde das System, bestehend aus 7 IR-Strahlern und Reflektoren von Protiq gefertigt und installiert. Im Anschluss wurden Aufheizversuche durchgeführt, mit Dummy-Baujobs und ohne Laser, bis zu einer Beschichtungshöhe von 12 mm. Die wesentlichen Erkenntnisse waren dabei:

- Zieltemperaturen von 350°C und 480°C konnten erreicht werden
- Jeweils ca. 10s Aufheizzeit nach dem Auftragen einer neuen, kalten Pulverschicht nötig
- Gute Temperaturhomogenität (350°C ±10%), welche sich durch eine individuelle Ansteuerung der IR-Strahler noch weiter verbessern lässt
- Gute qualitative Übereinstimmung mit den Raytracing-Simulationsergebnissen

Die Heizversuche zeigten, dass das untersuchte Top-Heating Konzept funktioniert und damit eine Temperatur von 500°C erreicht werden kann. Zur Vermeidung eines hohen Temperaturgradienten in Aufbaurichtung ist dabei die Kombination mit einer entsprechenden Plattformheizung sinnvoll. Bis auf ein Proof-of-Concept unter Prozessbedingungen waren damit alle Voraussetzungen zur Auslegung eines Top-Heating Systems für die neue LBM-Projektanlage gegeben.

Als nächster Schritt war ursprünglich geplant, die im Rahmen des Verbundprojekts zu entwickelnde, teilautomatisierbare LBM-Anlage temperaturstabil auszuführen, und dort von vornherein ein Top-Heating System zu integrieren. Im weiteren Projektverlauf stellte sich jedoch heraus, dass die neue LBM-Anlage nicht mehr innerhalb der Laufzeit des Verbundprojektes fertiggestellt werden kann, so dass innerhalb der Projektlaufzeit auch keine Prozessuntersuchungen mit aktiver Heizung durchgeführt werden können. Gemeinsam mit dem Projektpartner DMG MORI wurde daher entschieden, doch die vorhandene LBM-Anlage LT30 SLM entsprechend umzubauen, um noch innerhalb der Projektlaufzeit ein Proof-of-Concept für das Top-Heating unter Prozessbedingungen zu ermöglichen.
Zur optischen Auslegung des Top-Heating Systems wurden erneut Raytracing-Simulationen durchgeführt. Das so ausgelegte System ermöglicht die homogene Bestrahlung des Pulverbetts mit ~23 kW/m² und umfasst:

- Vier IR-Strahler mit 260 mm beheizter Länge und 220° QRC-Reflektorbeschichtung
- Reflektorbaugruppe
- Pyrometer Optris CTfast LT zur Temperatursteuerung des Systems
- Schaltschrank zur elektrischen Versorgung und Kommunikation mit der Steuerung der LT30-Anlage

Nach der Auslegung erfolgten Konstruktion, Herstellung und Installation des Systems bei DMG Mori. Mit der so umgerüsteten LBM-Anlage konnte erstmals ein Baujob mit 5 Dichtewürfeln aus AlSi10Mg durchgeführt werden, bei dem während des Bauprozesses die Oberflächentemperatur mittels Top-Heating in 5mm-Schritten um jeweils 50°C erhöht wurde (70°C,150-300°C). Untersuchungen der Dichte und Bauteilqualität ergaben, dass mit steigender Vorheiztemperatur die Randporosität der Bauteile ansteigt, was auf einen zu hohen Energieeintrag hinweist. Dies könnte mit angepassten Materialparametern, wie z.B. einer verringerten Laserleistung, vermutlich verhindert werden. Der ebenfalls beobachtete Bauteilverzug lässt sich vermutlich auf die Aufheizung der Baukammer zurückführen. Eine temperaturstabile Auslegung mit entsprechender Entkopplung von Laseroptik und Prozesskammer wäre daher empfehlenswert.

Andere in der Teilvorhabensbeschreibung genannten Heizmethoden konnten leider nicht untersucht werden:

- <u>Mantelheizung</u>: Aufheizung des Bauraumvolumens mit IR-Strahlern von der Seite durch ein transparentes Quarzrohr, thermische Abschirmung durch wassergekühlte Manschette
    - Als Nachrüstlösung für die bestehende LT30 SLM Anlage: Konnte aufgrund mangelnder Kapazität in den Bereichen Entwicklung und Konstruktion nicht umgesetzt werden.
    - Als Wechselbehälter für den Bauraum der neu entwickelnden LBM-Anlage: Konnte aufgrund der verzögerten Fertigstellung der neuen LBM-Anlage nicht mehr umgesetzt wurden.
- <u>Plattformheizung</u>: Für einen Hochtemperatur LBM-Prozess ist eine Plattformheizung vermutlich unverzichtbar. Üblicherweise erfolgt die Aufheizung der Bauplatte indirekt über die darunterliegende Montageplatte, die ihrerseits mittels integrierter Heizpatronen oder flachen Keramikheizelementen erhitzt wird. Im Rahmen des AP sollte getestet werden, ob sich Heraeus Black.Infrared Strahler für diesen Zweck eignen. Dadurch dass diese Strahler 2021 Heraeus-intern abgekündigt wurden, konnten geplante Versuche zur Verwendung als Plattformheizung nicht mehr durchgeführt werden.

2 Teil II: Schlussbericht

2.1 Aufgabenstellung

Das im Verbundvorhaben definierte Ziel bestand darin, eine prototypische Linienintegration zur Serienfertigung von hybrid additiven Bauteilen in der Automobilindustrie zur Umsetzung zu bringen. Die Materialien der Serienproduktion werden dabei gezielt auf die Bedürfnisse der Automobilindustrie und individuell auf den Anwendungsfall abgestimmt sein. Dazu werden individuelle hochfeste Stahl- und Aluminiumwerkstoffe mit einer reproduzierbaren Pulvercharakteristik von den Pulverherstellern entwickelt.

Bei der Verarbeitung dieser Metallpulvermaterialien im LBM-Prozess ergeben sich jedoch aufgrund der ungleichmäßigen lokalen Aufheizung und Abkühlung der Werkstücke im Pulverbett während des Bauprozesses häufig Spannungsrisse. Ebenso müssen viele Werkstücke nach dem Bauprozess in einem weiteren Prozessschritt temperaturbehandelt werden, um eine Spannungsfreiheit im Material zu gewährleisten. Die Rissentstehung und potentiell auch zusätzliche Wärmebehandlungen lassen sich vermeiden, wenn man während des Bauprozesses definiert hohe Umgebungstemperaturen von ≥500°C einstellt. Um das robuste und zuverlässige Verarbeiten der Pulver in der LBM-Nlage gewährleisten zu können, muss zunächst eine neuartige Bauraumheizung entwickelt und in die Linie integriert werden.

Das Ziel des Teilvorhabens von Heraeus war die Entwicklung und Optimierung einer Hochtemperatur-Bauraumheizung (≥ 500°C) für die im Rahmen des Verbundprojekts verwendete LBM-Maschine LASERTEC 30 SLM von DMG Mori. Die angestrebten Vorteile sind dabei die Verbesserung der Bauteilqualität, das Vermeiden von Spannungsrissen sowie Verarbeitungsmöglichkeiten für neue, auf die Bedürfnisse der Automobilindustrie abgestimmte Werkstoffe mittels Laser-Strahlschmelzen zu ermöglichen. Die Bauraumtemperatur soll idealerweise durch mehrere, sich ergänzende Infrarotsysteme wie beispielsweise Top-Heating, Bauplattformheizung und Pulvervorlagenheizung erzielt werden.

2.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Seit März 2020 bis hinein ins Jahr 2022 gab es durch die Corona-Pandemie Einschränkungen, die für das Projekt ReAddi relevant waren. Dies betraf im Wesentlichen die Reduktion von Reisen und Einschränkungen durch die Kontaktbeschränkungen. Des Weiteren gab es bei verschiedenen Projektpartnern durch Kurzarbeit oder verpflichtendes Homeoffice Einschränkungen bei der Zugänglichkeit von Anlagen, Versuchsständen und Laboren bzw. bei der Durchführung von vor-Ort Tätigkeiten, sowie allgemein Verzögerungen und Mehraufwände bei den üblichen betrieblichen Abläufen. Dies hatte eine deutliche Abweichung von der ursprünglichen Zeit- und Arbeitspaketplanung zur Folge.

2.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Vor Beginn des Vorhabens wurde ein Arbeitsplan mit allen Arbeitspaketen aus dem Teilvorhaben definiert. Die ursprünglich geplante Laufzeit des Vorhabens vom 01.10.2019 bis 30.09.2022 wurde mehrmals zuwendungsneutral bis zum 31.12.202023 verlängert, weshalb die Arbeitspaketplanung (siehe Tab. 1) im Laufe des Vorhabens angepasst wurde.

AP Nummer:	Arbeitspaket:	Q4/19	Q1/20	Q2/20	Q3/20	Q4/20	Q1/21	Q2/21	Q3/21	Q4/21	Q1/22	Q2/22	Q3/22	Q4/22	Q1/22	Q2/23	Q3/23	Q4/23
1	**Technische Grundlagen Heizsystem**																	
1.1	Top Heating																	
1.1.1	Raytracing Simulation	A	A	A	A	A												
1.1.2	Mechanische Integration der Strahler			A	A				A									
1.1.3	Aufheizversuche					A												
1.2	Pulvervorheizung																	
1.2.1	Strahlerdefinition und -Integration	A	A															
1.2.2	Heizversuche			A														
1.3	Plattformheizung mit Flächenstrahlern																	
1.3.1	Machbarkeitsuntersuchung		A	A	A	A	A											
1.3.2	Mechanische Integration in Montageplatte				A	A	A	A	A									
1.3.3	Heizversuche								A									
1.4	Mantelheizung																	
1.4.1	Voruntersuchung verschiedener Konzepte	A	A	A	A	A												
1.4.2	Mechanische Integration			A	A	A			A									
1.4.3	Heizversuche						A											
2	**Befähigung Hardware**																	
2.1	Auswahl und Implementierung Heizsysteme						A	A	A									
M1	**SLM-Anlage bestückt**																	
3	**Temperaturmesstechnik**																	
3.1	Definition Messtechnik Bauraumheizung		A	A	A	A	A	A										
3.2	Definition Mess- und Regelparameter								A	A	A							
M2	**KritischeParameter Digitale Prozesskette**																	
4	**Systematische Untersuchungen**																	
4.1	Systematische Untersuchungen										A	A	A					

A Laut Antrag
Aktualisiert
Erledigt
A Im Antrag, aber entfallen

Tab. 1: Arbeitspaketplanung Teilvorhaben Hochtemperatur-Bauraumheizung

Der erste in der Arbeitspaketplanung aufgeführte Meilenstein M1 dieses Teilvorhabens war die Bestückung der LBM-Anlage mit einer Hochtemperatur-Bauraumheizung bis zum Ende des 24. Monats der Projektlaufzeit. Zu diesem Zeitpunkt sollen folgende Punkte abgeschlossen sein:

1. Erforschung der Heizmethoden Top Heating, Pulvervorheizung, Plattformheizung und Mantelheizung abgeschlossen
2. Heizmethoden hinsichtlich Ihrer technischen Machbarkeit und Integrierbarkeit in die Anlage bewertet
3. Prototyp der Hochtemperatur Bauraumheizung bestehend aus mindestens einer der Methoden konstruiert, gefertigt und in die LBM-Anlage integriert

Zu 1: Die Erforschung der Methode Top-Heating wurde abgeschlossen. Nach ersten Versuchen mit einem frühen Prototyp einer Mantelheizung außerhalb des Verbundvorhabens wurden weitere Arbeiten daran aus Kapazitätsgründen hintenangestellt und letztendlich verworfen. Die anderen Methoden wurden aus technischen Gründen nicht weiterverfolgt.

Zu 2: Die Bewertung konnte erst nach dem erfolgreichen Test des Top-Heating Systems unter Prozessbedingungen zum Ende des Projekts erfolgen.

Zu 3: Aufgrund der in Abschnitt 2 geschilderten Umstände waren die Rahmenbedingungen für das Vorhaben deutlich anders, als während des Antragszeitraums ursprünglich geplant. Erst in der neu zu entwickelnden, temperaturstabilen LBM-Anlage sollte ein Heizsystem integriert werden. Da diese allerdings innerhalb der Projektlaufzeit nicht fertiggestellt werden konnte, wurde beschlossen als Proof-of-Concept ein Heizsystem in die bestehende Projekt-LBM-Anlage einzubauen. Dies erfolgte jedoch auch erst gegen Ende des Projekts und nicht wie ursprünglich geplant zur Halbzeit.

Aufgrund der umfangreichen zeitlichen Verzögerungen im Projekt war es nicht möglich systematische Untersuchungen mit dem Heizsystem durchzuführen, der Meilenstein M2 entfiel somit für dieses Teilvorhaben.

2.4 Der Stand von Wissenschaft und Technik

Bei LBM-Anlagen kommen bisher hauptsächlich mittels elektrischen Heizpatronen beheizte Bauplattformen zum Einsatz, mit typischen Heiztemperaturen von ca. 200°C. Die Vorwärm- bzw. Umgebungstemperatur des Werkstücks ergibt sich dann durch Wärmeleitung von unten durch den bereits verfestigten Teil des Werkstücks und das Pulverbett sowie den Energieeintrag des Lasers, sie beträgt oft nur um die 100°C. Das hat bei fortschreitendem Baujob einen starken Temperaturgradienten nach oben hin zur Folge. Einige Metalllegierungen wie hochlegiertes Aluminium oder martensitisch härtbare Stähle können aus diesen

Gründen bisher nur schwer mittels LBM verarbeitet werden, da sie durch den Aufbau großer thermischer Spannungen zur Rissbildung neigen.
Vereinzelt bieten Anlagenhersteller schon elektrisch beheizte Stempel (bis 500°C) für die Nachrüstung von Bauplattformen an, diese verkleinern den Bauraum jedoch wesentlich, und sind auch nur von unten beheizt, so dass sich weiterhin ein großer Temperaturgradient zur Pulveroberfläche ausbilden kann. Daraus resultieren ungleichmäßige Gefügestrukturen (anisotrope Werkstoffeigenschaften). Damit ist keine bauzeitneutrale Heizung des Werkstücks möglich und es können keine isotropen Bauteileigenschaften sichergestellt werden.
Bei Anlagen für das Laserstrahlsintern von Kunststoffmaterialien hat sich bereits das Top-Heating der Pulveroberfläche mittels Infrarotstrahlern etabliert. Im LBM-Bereich kommt Top-Heating bisher nicht zum Einsatz.
Als Alternative zur Plattformheizung mit Heizpatronen und ggfs. auch zu einer Mantelheizung existieren Ansätze zur induktiven Heizung des Bauraums. Die Technologie befindet sich jedoch noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium. So konnte eine entsprechende Heiztechnologie bisher nur mit einem zylindrischen Bauraum von wenigen Zentimetern Durchmesser demonstriert werden. Es ist unklar, ob sich die induktive Heizung überhaupt für Bauraumgrößen eignet, die relevant für die industrielle Serienfertigung sind.

2.5 Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse

2.5.1 Technische Grundlagen Heizsystem

Im Projektantrag wurde für das Heizsystem eine Zieltemperatur von 500°C angenommen, es stellte sich jedoch die Frage woher dieser oft gebräuchliche Wert von 500°C stammt.

Um abzuklären welche Materialien im Rahmen des ReAddi Projektes verarbeitet werden sollen und welche Anforderungen an die Vorheiztemperatur sich daraus ergeben, wurde ein entsprechender Fragebogen erstellt und an die Projektpartner verteilt.

Welche Materialien sollen im Rahmen des ReAddi-Projekts verarbeitet werden können und welche Vorheiztemperaturen sind dafür erforderlich?

Material	Heiztemperatur
AlSi10Mg	200°C
316L (1.4404)	100°C
Aluminium 7000er-Legierung	Unbekannt
H113 1.2344	>340°C (Martensit Start)
H11 1.2343	>300 °C (Martensit Start)
42CrMo4	<=500°C

Die Verarbeitung welcher Materialien mittels LBM wird Ihrer Meinung nach vom Markt gefordert und welche (Vor)Heiztemperaturen sind dafür notwendig?

Material	Heiztemperatur
AlSi10Mg	200°C
Hochlegierte Stähle	>400°C
H13	600-700°C
Inconel 939	500°C (?)
FeSi	800°C
Al7075	500°C
1.2709	40°C (EOS Parameter)
1.4404	80°C (EOS Parameter)
1.4540	35°C (EOS Parameter)
Hochfeste Werkzeugstähle	Ca. 500 – 700 °C
Schwer schweißbare Ni-Basis Legierungen	Ca. 500 – 700 °C

Abb. 1: Ergebnisse der Umfrage unter den ReAddi-Projektteilnehmern zu Materialien und Vorheiztemperaturen

Die Ergebnisse der Umfrage sind in Abb. 1 dargestellt. Die meisten der im Verbundprojekt verwendeten Demonstratoren bestehen jedoch aus AlSi10Mg, welches eigentlich keine hohe Vorheiztemperatur erfordert. Um die Zukunftssicherheit des Heizsystems dennoch zu gewährleisten, wurde an dem Temperaturziel von 500°C festgehalten. Eine weitere Rückmeldung war, dass eventuell eine geregelte Abkühlung der Werkstücke

nach einem Baujob von ca. 20 K/h hilfreich wäre, um die Anzahl der verarbeitbaren Materialien weiter zu erhöhen.

2.5.2 Top Heating

Simulative Voruntersuchungen

Zu Beginn des Projektes wurden die Voraussetzungen für die simulative Auslegung eines Top-Heating Systems mit DMG Mori diskutiert:

- Installation von Infrarotstrahlern im Inneren der Prozesskammer zur Vorheizung der Pulveroberfläche von oben. Als Beschichter-Position wird die Nullstellung für die Simulation als Randbedingung angenommen.
- Der Bauraum für die IR-Strahler in der Prozesskammer muss von DMG Mori unter Berücksichtigung der Strahlkegel der Laser und weiterer Messsysteme definiert werden. Das Gehäuse der Laseroptik oberhalb der Kammer muss ebenfalls hinzugefügt werden, um den Bauraum für das benötigte Pyrometer im Prozesskammer-Deckel vorzugeben.
- Es werden Informationen zu Materialien und Oberflächeneigenschaften der Komponenten im Inneren der Prozesskammer benötigt.
- Aufgrund der erhöhten Temperatur in der Prozesskammer wird ein alternatives, temperaturstabiles Material für die Beschichterlippe benötigt.

Basierend auf der von DMG Mori zur Verfügung gestellten CAD-Datei der Prozesskammer (siehe Abb. 2) und realistischen Annahmen für die optischen Materialparameter, wurde mittels der Software LightTools ein Raytracing-Simulationsmodell erstellt. Im Anschluss wurden umfangreiche Raytracing-Simulationen zur Auslegung eines Top-Heating Systems für die LBM-Anlage LT30 von DMG MORI durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Konfigurationen von IR-Heizstrahlern untersucht. Es konnte schließlich gezeigt werden, dass die Oberfläche des Pulverbetts mittels einer Anordnung von vier Infrarotstrahlern homogen bestrahlt werden kann. Um die Effizienz des Heizsystems zu verbessern und die in die Baukammer abgegebene Infrarotstrahlung zu minimieren, wurde zusätzlich ein Rahmen mit Aluminiumreflektoren entworfen, in den die Infrarotstrahler eingebaut werden können.

Abb. 2: CAD-Modell der Prozesskammer der LT30 SLM Anlage

Mit dieser Konfiguration wurden verschiedene Parametervariationen durchgeführt, um das System weiter zu optimieren. Es zeigte sich, dass vor allem die Installationshöhe der Strahler in der Baukammer die Effizienz und Bestrahlungshomogenität beeinflusst.

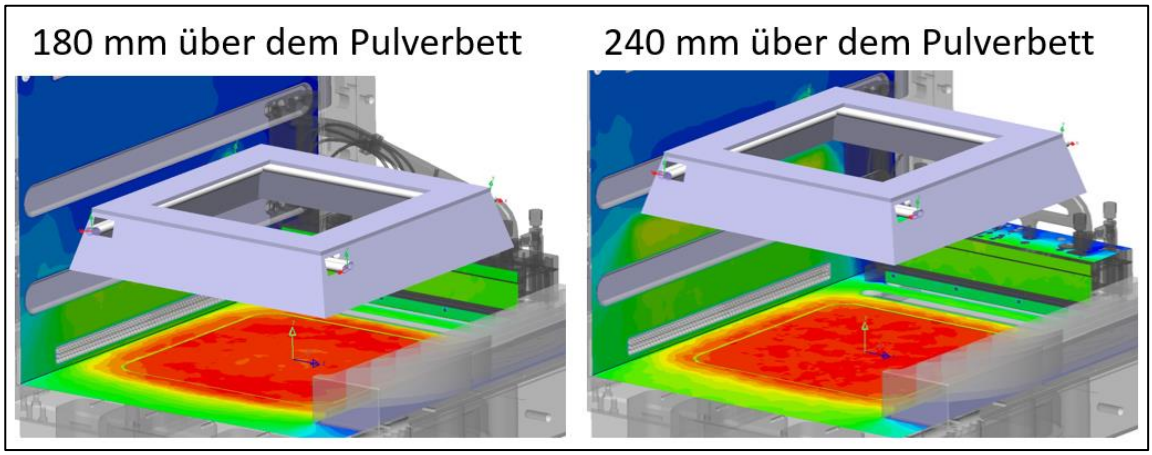

Abb. 3: Simulierte Bestrahlungsstärkeverteilung in der Prozesskammer und auf dem Pulverbett für zwei verschiedene Abstände zwischen Top-Heating System und Pulveroberfläche

Für eine möglichst hohe Effizienz sollten die IR-Strahler (inkl. Reflektorbaugruppe) in einem Abstand von ca. 180 mm über dem Pulverbett installiert sein (siehe auch Abb. 3). Dies würde aber zu einer Kollision mit dem Beschichter führen. Bei einem höheren Abstand von 240 mm könnte eine Kollision durch geringe mechanische Änderungen vermieden werden, allerdings entweicht hierbei deutlich mehr IR-Strahlung in die Prozesskammer. Da die aktuelle LBM-Anlage jedoch nicht für die zusätzliche thermische Belastung ausgelegt ist, wurde beschlossen, Heizversuche zunächst in einer offenen und temperaturstabilen Versuchsanlage (DTM Sinterstation) bei Protiq durchzuführen.

Heizversuche in einer Versuchsanlage

Für die Auslegung eines entsprechenden Top Heating Systems für die runde Bauplattform der Testanlage wurden ebenfalls Raytracing-Simulationen durchgeführt. Anschließend wurde das System, bestehend aus 7 IR-Strahlern und Reflektoren von Protiq gefertigt und installiert. Wie in Abb. 4 a) dargestellt ist, wurden Laserfenster und -optik für die Aufheizversuche entfernt, um stattdessen eine IR-Kamera zur Aufnahme der Pulver-Oberflächentemperatur zu installieren.

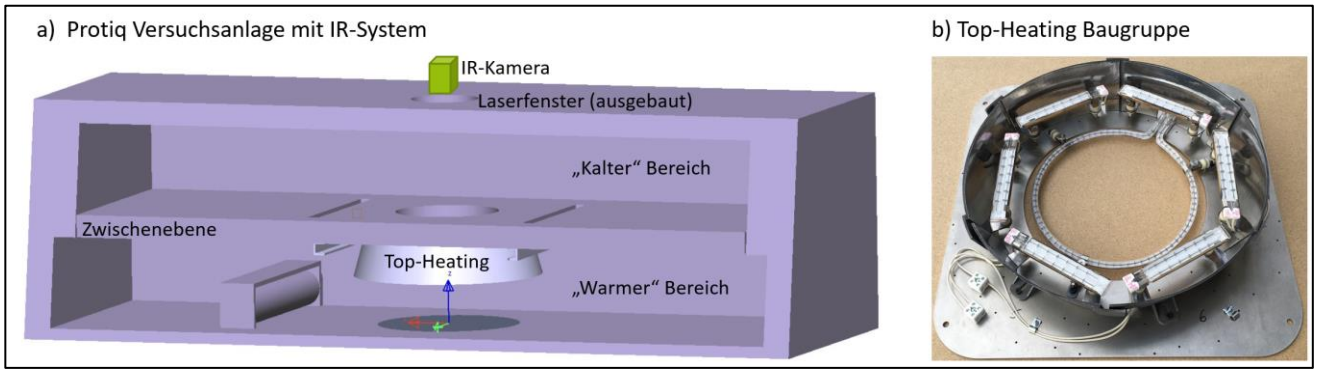

Abb. 4: a) CAD-Ansicht des Innenraums der Versuchsanlage bei Protiq, mit installiertem Top-Heating System. b) Foto der Top-Heating Baugruppe für die runde Bauplattform, bestehend aus Grundplatte, Seitenreflektoren und 7 IR-Strahlern.

Vor dem Start der Heizversuche musste die Messtechnik für die berührungslose Temperaturerfassung für das verwendete AlSi10Mg-Pulver kalibriert werden, es wurde ein Emissivitätswert von ε=0,43 ermittelt. In einem ersten Aufheizversuch wurde eine Pulveroberflächentemperatur von 350°C vorgegeben (Bauplattformheizung + IR-Heizung). Nach einer Aufheizphase wurde ein Dummy-Baujob (Beschichtungsstärke 50 µm, ohne Laser) gestartet und bis zu einer Beschichtungshöhe von 12 mm durchgeführt. Die Pulvertemperatur wurde dabei mittels Pyrometer und IR-Kamera aufgezeichnet.

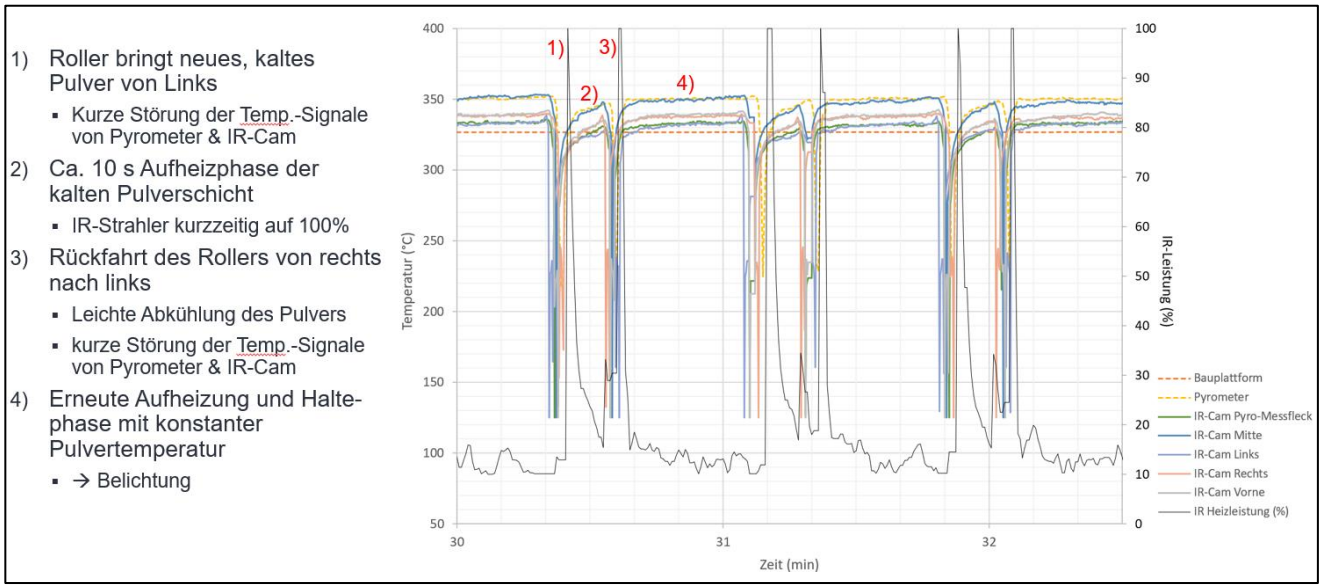

Abb. 5: Ablauf (links) und Temperaturmesswerte (rechts) während des Dummy-Baujobs mit dem Top-Heating System in der Testanlage

In Abb. 5 ist ein Ausschnitt aus dem entsprechenden Temperatur-Zeit-Diagramm gezeigt. Die wesentlichen Erkenntnisse daraus sind:

- Die Zieltemperatur von 350°C konnte ohne Probleme erreicht werden. Die Halteleistung der IR-Strahler betrug etwa 900W (Pulverbett mit Ø 317 mm); sie steigt mit der Schichtdicke
- Jeweils ca. 10s Aufheizzeit nach dem Auftragen einer neuen, kalten Pulverschicht; IR-Leistung hierbei kurzzeitig bei 100% (6 kW elektrische IR-Leistung)
- Gute Temperaturhomogenität mit 350°C ± 10%; Die Homogenität lässt sich durch eine individuelle Ansteuerung der IR-Strahler noch weiter verbessern.

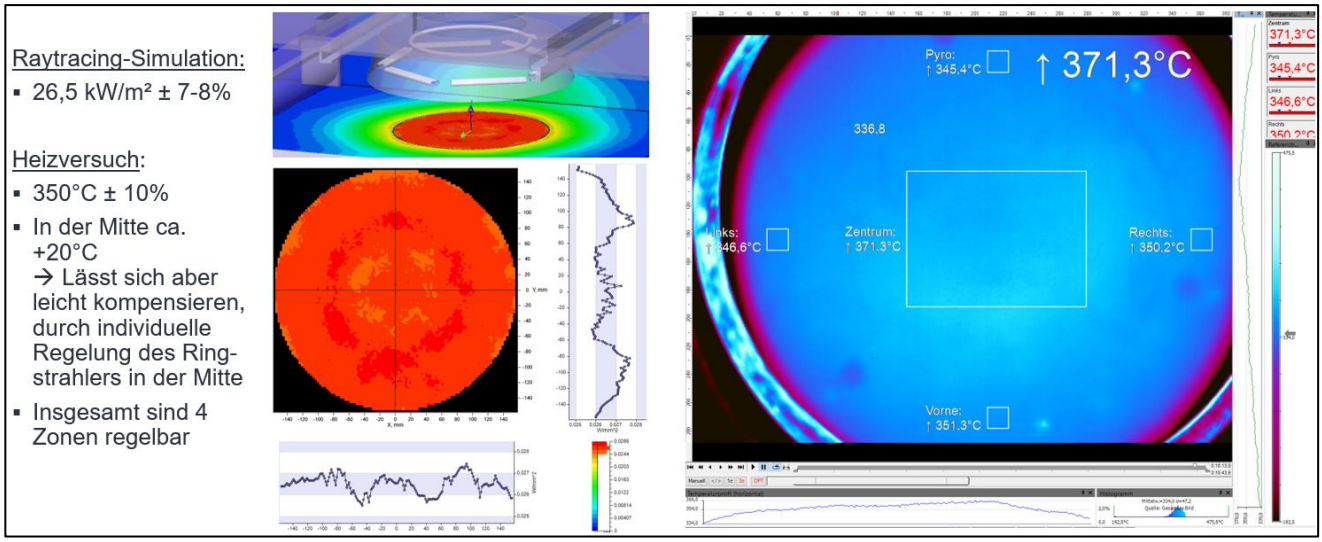

Abb. 6: Links: Mittels Raytracing simulierte Bestrahlungsstärkeverteilung auf der Pulveroberfläche. Rechts: Mit der IR-Kamera während des Heizversuchs aufgenommene Wärmebildaufnahme der Pulveroberfläche

Mittels Raytracing wurde eine mittlere Bestrahlungsstärke von 26,5 kW/m² ±7-8% auf dem Pulverbett ermittelt. Mit der IR-Kamera konnte während des Heizversuchs eine Temperatur von 350°C ±10% gemessen werden, die Temperaturhomogenität zeigt somit eine gute qualitative Übereinstimmung zu den Simulationsergebnissen.

In einem weiteren Versuch konnte die Pulveroberfläche bis auf ca. 480°C aufgeheizt werden. Höhere Temperaturen wären möglich gewesen, aber der Versuch wurde vorher abgebrochen, um die Dichtungen der Prozesskammer nicht zu beschädigen.

Die Heizversuche in der Versuchsanlage haben gezeigt, dass das untersuchte Top-Heating Konzept funktioniert und damit eine Temperatur von 500°C erreicht werden kann. Um einen Temperaturgradienten in Aufbaurichtung zu vermeiden, sollte dabei immer auch eine entsprechende Plattformheizung verwendet werden. Bis auf ein Proof-of-Concept unter Prozessbedingungen waren damit alle Voraussetzungen zur Auslegung eines Top-Heating Systems für die neue, temperaturstabile LBM-Anlage gegeben.

Heizversuche unter Prozessbedingungen

Als nächster Schritt war ursprünglich geplant, die im Rahmen des Verbundprojekts neu zu entwickelnde, teilautomatisierbare LBM-Anlage temperaturstabil auszuführen, und dort von vornherein ein Top-Heating System zu integrieren. Im weiteren Projektverlauf stellte sich jedoch heraus, dass die Fertigstellung der neuen LBM-Anlage erst gegen Ende des Projektes erfolgen würde, so dass innerhalb der Projektlaufzeit keine Prozessuntersuchungen mit aktiver Heizung durchgeführt werden könnten.

Gemeinsam mit dem Projektpartner DMG MORI wurde daher entschieden, doch die vorhandene LBM-Anlage LT30 SLM entsprechend umzubauen, um noch innerhalb der Projektlaufzeit ein Proof-of-Concept für das Top-Heating unter Prozessbedingungen zu ermöglichen.

Zur optischen Auslegung des Top-Heating Systems wurden erneut Raytracing-Simulationen durchgeführt. Das auf diese Weise ausgelegte System (siehe Abb. 7 und Abb. 8) ermöglicht die homogene Bestrahlung des Pulverbetts mit ~23 kW/m² und umfasst:

- Vier IR-Strahler mit 260 mm beheizter Länge und 220° Reflektorbeschichtung (QRC mit Goldschicht)
- Reflektorbaugruppe, um eine bessere Effizienz zu erzielen und die Abstrahlung in die Prozesskammer zu reduzieren.
- Pyrometer Optris CTfast LT mit 25:1 Optik an einem Port an der Oberseite der Prozesskammer. Der Messfleck des Pyrometers befindet sich am Rand des Pulverbetts und dient zur Temperatursteuerung des Systems
- Schaltschrank zur elektrischen Versorgung der IR-Strahler und zur Kommunikation mit der Steuerung der LT30-Anlage

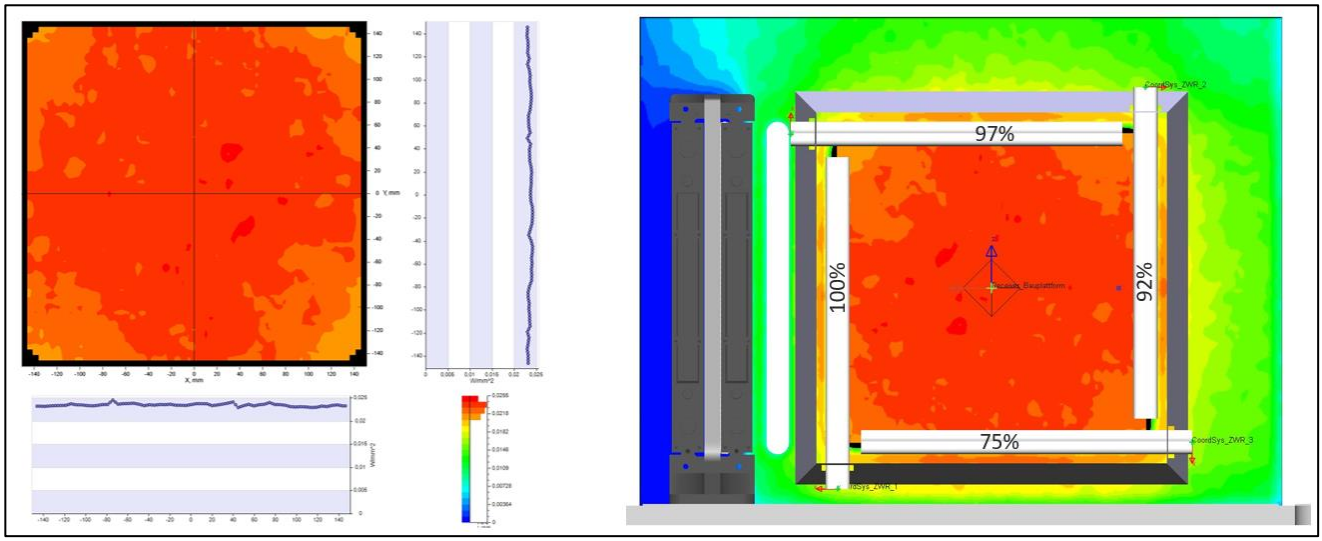

Abb. 7: Links: Simulierte Bestrahlungsstärkeverteilung auf der Pulveroberfläche. Rechts: Anordnung der vier IR-Strahler oberhalb des Pulverbetts und deren Leistungseinstellung

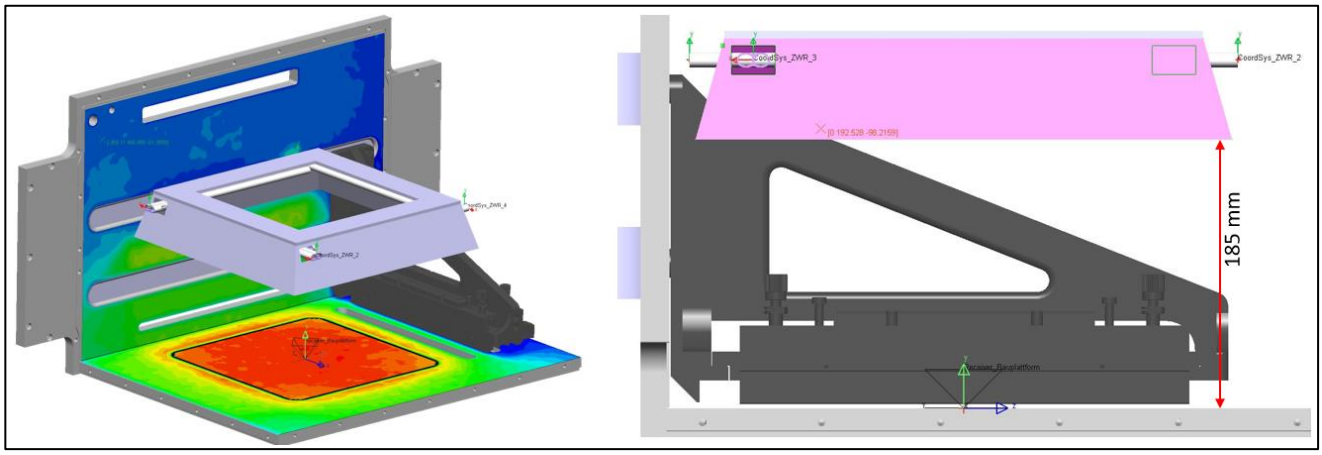

Abb. 8: Raytracing-Simulationsmodell des Top-Heating Systems für die LT30 SLM Projektanlage

Die Herstellung der IR-Strahler, Beschaffung des Pyrometers, sowie Konstruktion und Fertigung des Schaltschrankes erfolgten bei Heraeus Noblelight. Nach der Herstellung der Strahler wurden diese zunächst intern vermessen, anschließend wurde sämtliches Material an DMG Mori geliefert.

Bei der Vermessung wurde die radiale Abstrahlcharakteristik der IR-Strahler bestimmt. Es zeigte sich eine gleichmäßige Abstrahlung nach unten hin, ohne dominanten Peak. Diese gute Bestrahlungshomogenität kann durch den inneren, diffus-reflektierenden QRC-Reflektor (weiße Beschichtung) erzielt werden. Gleichzeitig weisen die Strahler aufgrund der zusätzlichen äußeren Goldbeschichtung eine hohe Reflektivität (~92%) und geringe Abstrahlung nach oben hin auf. Mittels der Messergebnisse konnte das Raytracing-Simulationsmodell weiter verfeinert werden, was in einer nochmals leicht verbesserten Bestrahlungshomogenität resultierte.

Die konstruktive Umsetzung des Systems ausgehend von dem Simulationsmodell, erfolgte durch DMG Mori. Dies umfasste:

- CAD-Konstruktion des Top-Heating Systems, basierend auf dem Raytracing-Simulationsmodell
  - Halterahmen mit Reflektoren
  - Halterung zur Befestigung des Rahmens an der Kammerdecke zum leichten Ein- und Ausbau
- Konstruktive Umsetzung von Maßnahmen zur Integration des Heizsystems in die Prozesskammer
  - Verkürzung des Beschichters nach oben hin, um Kollision mit dem System zu vermeiden
  - Konstruktion einer Abschirmung für den Beschichter, damit empfindliche Komponenten nicht der direkten IR-Strahlung ausgesetzt sind
  - Konstruktion eines Abschirmbleches zum Schutz der Kunststoffhandschuhe in der Tür
  - Elektrische Durchführung mit Steckverbindern
  - Modifikation des Beschichters zur Aufnahme einer temperaturstabilen Bürste anstelle der üblichen Silikonlippe

Die geschilderten Arbeiten wurden seitens Heraeus Noblelight entsprechend begleitet und unterstützt. Anschließend erfolgten Materialbeschaffung, Fertigung und Montage der mechanischen Komponenten des Top-Heating Systems durch DMG Mori. Abb. 9 und Abb. 10 zeigen Bilder des fertigen Systems.

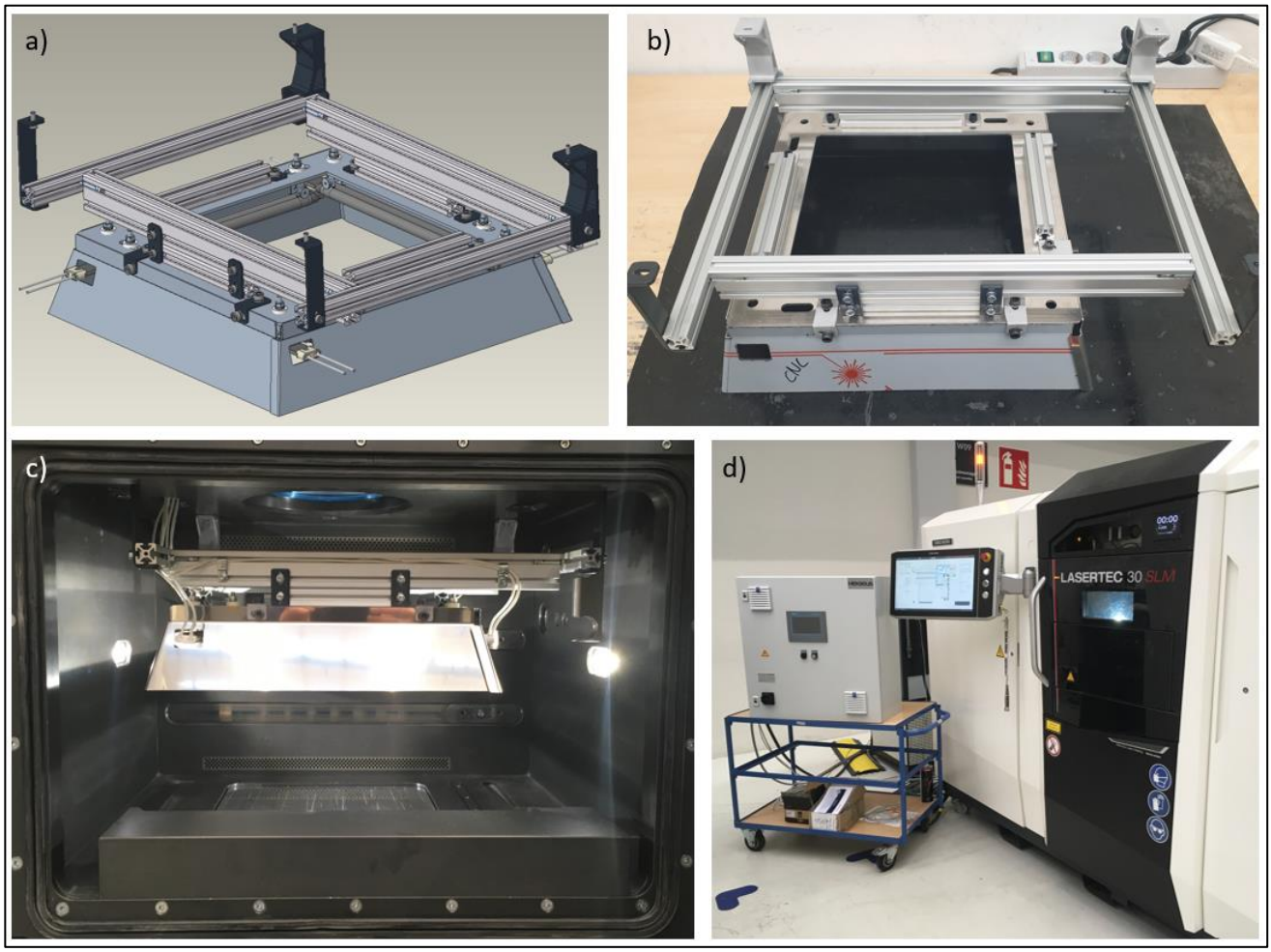

Abb. 9: a) CAD-Modell des Heizsystems mit Halterahmen und Seitenreflektoren. b) Halterahmen und Reflektoren während der Montage. c) Integration des Top-Heating Systems in der Prozesskammer. d) Außenansicht der LT30 SLM Anlage mit der IR-Steuerung

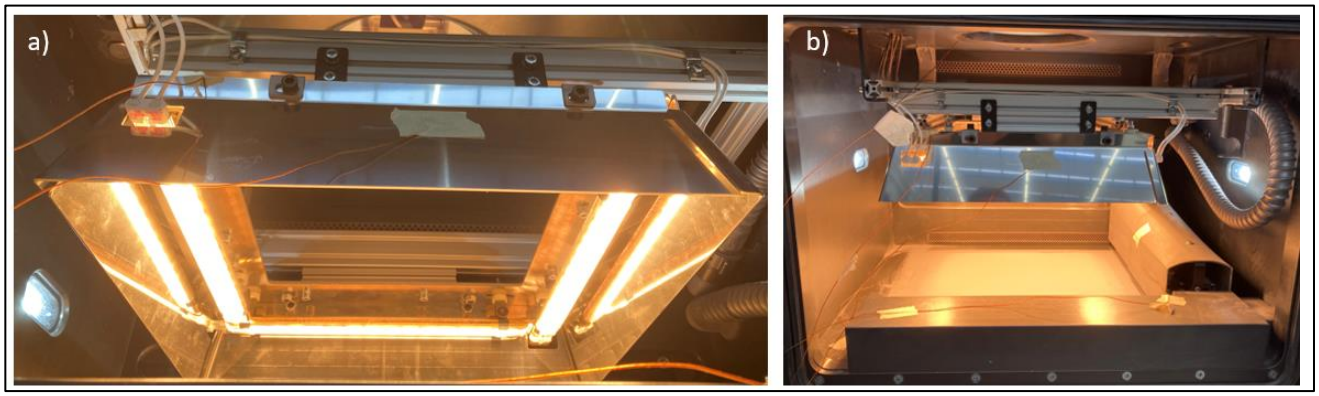

Abb. 10: a) Blick von unten in die Reflektorbaugruppe des Top-Heating Systems. b) Prozesskammer mit Top-Heating System. Auf der rechten Seite ist der von DMG Mori modifizierte Beschichter samt Hitzeschutzabdeckung zu sehen.

Bei der Inbetriebnahme des Top-Heating Systems wurden bei geöffneter Tür IR-Kamera Aufnahmen des beheizten Pulverbetts angefertigt (siehe Abb. 11). Hierbei zeigte sich, dass die Position des Pyrometermessflecks am hinteren Rand des Pulverbetts ungünstig gewählt wurde, da eine Temperaturdifferenz von ca. 30-40°C zw. Rand und Mitte der Pulveroberfäche festgestellt wurde. Eine Modifikation der Pyrometerbefestigung zur Anpassung der Messfleck-Position konnte im Rahmen des Projekts nicht mehr umgesetzt werden.

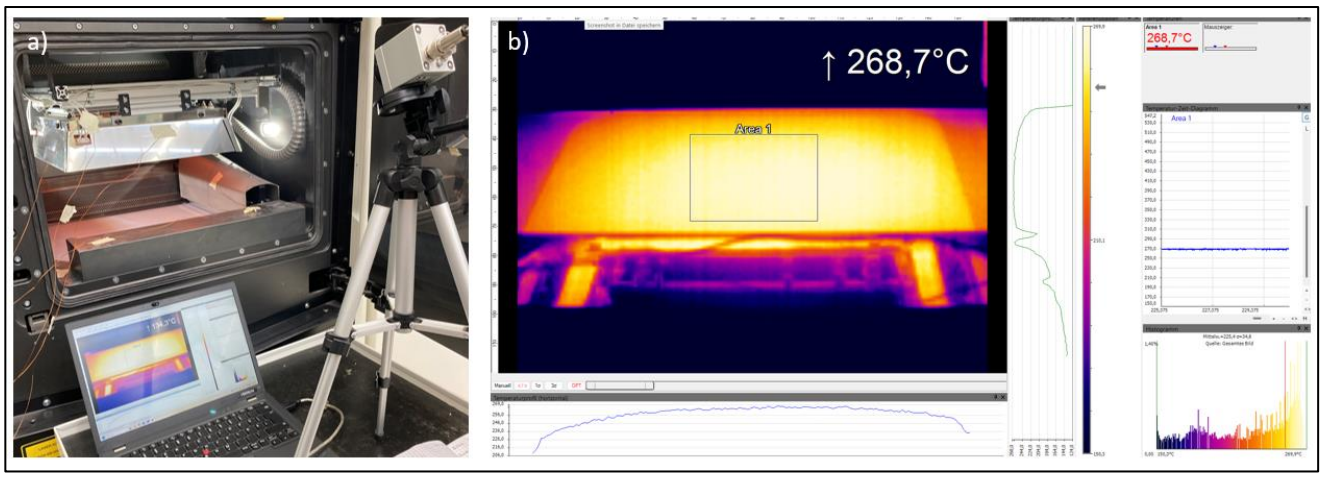

Abb. 11: a) Anfertigung von IR-Kamera aufnahmen bei der Inbetriebnahme des Top-Heating Systems. b) Wärmebild mit Temperaturverteilung auf der Pulveroberfläche

Anhand der Wärmebilder wurden auch die relativen Leistungseinstellungen der 4 Heizzonen für eine bestmögliche Temperaturhomogenität ermittelt, diese unterscheiden sich leicht von den mittels Raytracing-simulation ermittelten Einstellungen:

- Strahler 1 (links): 100%
- Strahler 2 (hinten): 80%
- Strahler 3 (rechts): 75%
- Strahler 4 (vorne): 97%

Vor dem eigentlichen Heizversuch unter Prozessbedingungen wurde der LBM-Prozessablauf mit aktivem Top-Heating System definiert und entsprechend in der Steuerungssoftware der LT30 SLM Anlage implementiert. Die Schritte 2-7 laufen während des Bauprozesses in einer Schleife ab:

1. Vorgabe der Oberflächentemperatur (mind. 150°C für sinnvolle Regelung)
2. Beschichtungsvorgang
3. Aktivierung der IR-Heizung
4. Start des Belichtungsvorgangs, sobald Zieltemperatur erreicht ist (T innerhalb Toleranzfenster)
5. IR-Heizung bleibt während des Belichtungsvorgangs aktiv, die Leistung wird heruntergeregelt um die Zieltemperatur zu halten
6. Deaktivierung der IR-Heizung
7. Absenkung der z-Achse

Mit der so umgerüsteten und betriebsbereiten LBM-Anlage konnte nun erstmals ein LBM-Baujob mit IR-Heizung durch ein Top-Heating System durchgeführt werden. Hierfür wurde ein Baujob mit 5 Dichtewürfeln (bzw. Quadern) aus AlSi10Mg in den vier Ecken und der Mitte der Bauplattform gestartet. Während des Bauprozesses wurde die Oberflächentemperatur des Pulverbetts mittels Top-Heating in 5 mm-Schritten um jeweils 50°C erhöht (70°C,150-300°C). Es wurden hierfür die Standard AlSi10Mg Parameter verwendet.

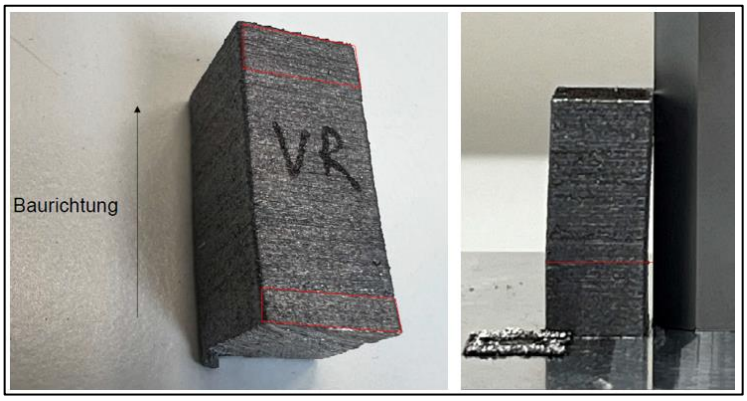

Abb. 12: Links: Dichtequader aus dem Baujob mit aktivem Top-Heating System und steigender Vorheiztemperatur. Rechts: deutlich sichtbarer Verzug des Bauteils

Bei den so erzeugten Bauteilen kam es bei zunehmenden Vorheiztemperaturen oberhalb von ca. 150°C zu einem deutlichen Verzug (siehe Abb. 12). Ursache waren vermutlich Temperatureinflüsse als Störgrößen auf die Maschinenkomponenten, da die Prozesskammer der LBM-Anlage nicht für erhöhte Temperaturen ausgelegt ist. Eine temperaturstabile Auslegung mit entsprechender Entkopplung von Laseroptik und Prozesskammer wäre daher empfehlenswert.

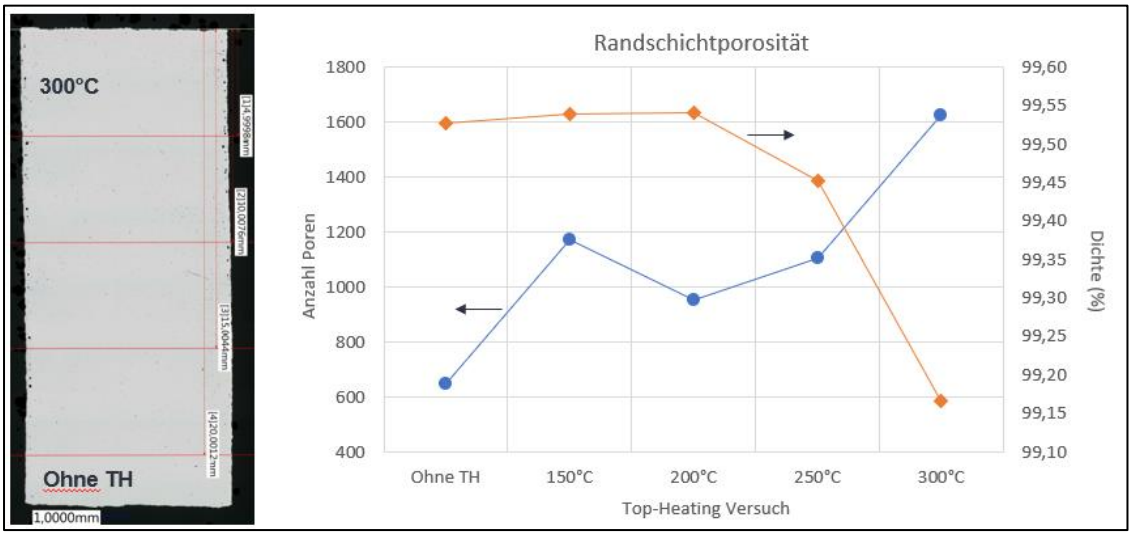

Abb. 13: Links: Schliffbild eines Dichtequaders mit den 5 Vorheiz-Temperaturzonen. Rechts: Auswertung der Dichte und Randschichtporosität

Von den Bauteilen wurden durch DMG Mori Schliffbilder angefertigt und hinsichtlich der Dichte und Bauteilqualität untersucht. Die in Abb. 13 gezeigten Daten zeigen, dass mit steigender Top-Heating Temperatur die Porosität am Rand ansteigt und die Bauteildichte abnimmt, was auf einen zu hohen Energieeintrag aufgrund der zusätzlichen IR-Heizung hinweist. Dies könnte mit angepassten Baujob-Parametern, beispielsweise verringerter Laserleistung, vermutlich verhindert werden.

2.5.3 Pulvervorheizung

Nach Abklärung mit DMG Mori wurde klar, dass sich die Bauweise der Beschichter in der LT30 SLM Anlage nicht zur Integration von Infrarotstrahlern eignet. Die Untersuchung einer entsprechenden Pulvervorheizung im Rahmen des Projekts war somit technisch nicht möglich.

2.5.4 Plattformheizung mit Flächenstrahlern (*Bottom-Heating*)

Die detaillierten Untersuchungen zum Top-Heating in Abschnitt 2.5.2 haben gezeigt, dass diese Methode in Kombination mit einer Bauplattformheizung eingesetzt werden sollte, um einen starken Temperaturgradienten in Aufbaurichtung (z-Achse) zu verhindern. Üblicherweise erfolgt die Aufheizung der Bauplatte indirekt über die darunterliegende Montageplatte, die ihrerseits mittels integrierter Heizpatronen oder flachen Keramikheizelementen erhitzt wird. Ein zum Antragszeitpunkt bei Heraeus Noblelight in der Entwicklung befindlicher flacher Infrarotstrahler (Black.Infrared) erreicht Oberflächentemperaturen von bis zu 1000°C. Wie in Abb. 14 dargestellt, sollte getestet werden, ob er sich für das Aufheizen des Pulvers mittels Wärmeleitung über die Bauplattform eignet. Da der Strahler thermisch von anderen Komponenten des Bauraums isoliert werden muss, sollen auch die Temperatursteuerung und die Lebensdauer der Strahler in erhöhter Umgebungstemperatur untersucht werden.

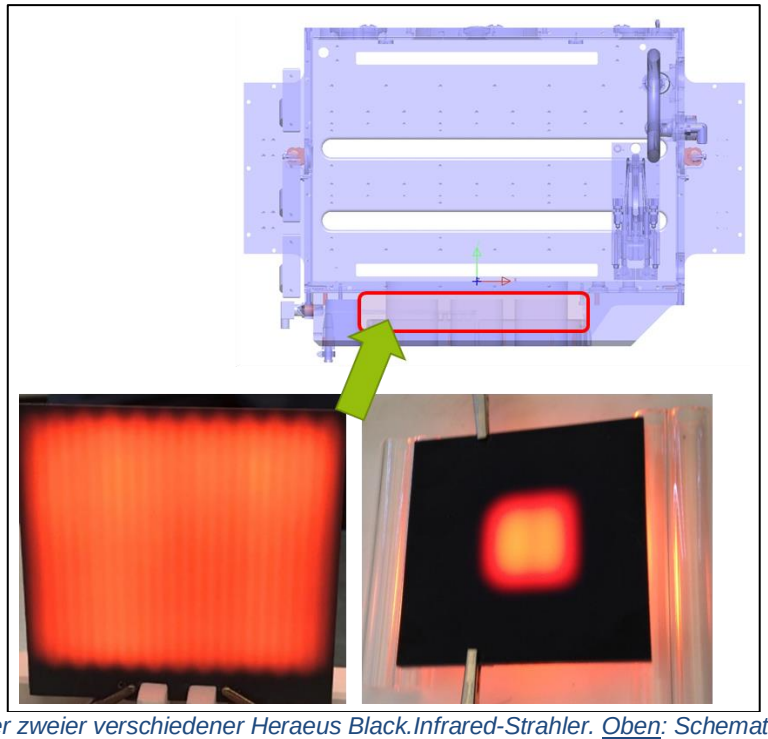

Abb. 14: Unten: Bilder zweier verschiedener Heraeus Black.Infrared-Strahler. Oben: Schematische Andeutung der Verwendung als Plattformheizung

Die Vorteile von Black.Infrared-Strahlern für diese Anwendung sind:

- Oberflächentemperatur von bis zu 1000°C
- Schnelle Aufheizung, individuelles Design möglich
- Flache Bauweise (ca. 4 mm Dicke)

Mit dem Projektpartner DMG Mori wurde zu Beginn des Projektes besprochen, an einer Baugruppe bestehend aus Montageplatte und Bauplattform außerhalb der LBM Anlage Tests zur Integration der Black.Infrared-strahler durchzuführen. Der Aufbau der Test-Baugruppe kann ähnlich erfolgen wie mit klassischen Heizelementen (z.B. Keramikheizplatten), die schon für diesen Zweck verwendet werden. Zusätzlich sollte ein gekühlter Spiegel, bzw. eine polierte Platte unterhalb des Heizelements eingesetzt werden, um die Wärmestrahlung nach unten hin abzuschirmen und die Heizleistung nach oben zur Bauplattform zu steigern. Der Aufbau sollte dann mit klassischen, bestehenden Lösungen verglichen werden.

Vor der Umsetzung des geplanten Testaufbaus wurden die Black.Infrared-Strahler im Jahr 2021 jedoch Heraeus-intern abgekündigt, so dass der Aufbau und die geplanten Versuche zur Verwendung als Plattformheizung nicht mehr durchgeführt werden konnten.

2.5.5 Mantelheizung (*Side-Heating*)

In diesem Arbeitspaket sollten verschiedene Möglichkeiten zur Realisierung einer Mantelheizung des Bauraums von der Seite, unter Verwendung der Heraeus Noblelight Strahlertechnologie untersucht werden. Ein erster Prototyp einer Mantelheizung wurde von Heraeus in einem bilateralen Projekt mit dem DMRC in Paderborn entwickelt. Wie in Abb. 15 gezeigt, geschieht die Aufheizung des Bauraumvolumens bei diesem Konzept mittels ringförmiger Infrarotstrahler durch ein transparentes Quarzrohr hindurch. Zur thermischen Abschirmung gegenüber den restlichen Anlagenkomponenten, sind die IR-Strahler dabei von einer wassergekühlten Manschette umgeben.

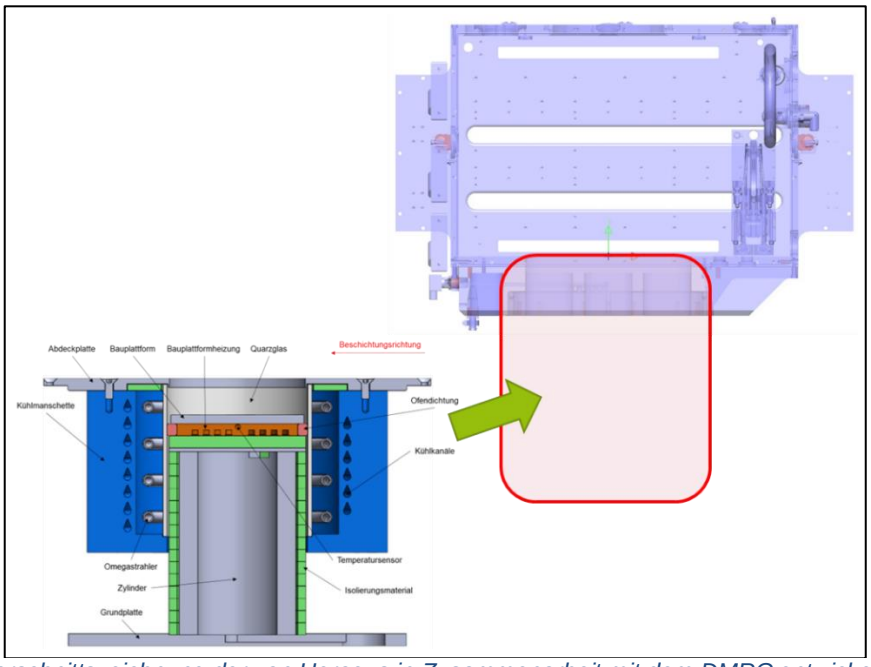

Abb. 15: Unten: Querschnittszeichnung der von Heraeus in Zusammenarbeit mit dem DMRC entwickelten Mantelheizung. Oben: Schematische Andeutung der Einbausituation in einer LBM-Anlage

Testergebnisse mit einem Prototyp der Mantelheizung am DMRC waren wegen Verzögerungen aufgrund der Corona-Pandemie erst im Dezember 2020 verfügbar. Sie zeigten, dass das Prinzip funktioniert und hohe Vorheiztemperaturen von >>500°C erreicht werden können. Ein ungelöstes Problem war jedoch die Realisierung einer hochtemperaturtauglichen Abdichtung zwischen der Montageplatte und dem Quarzrohr, welches im Vergleich zu Metallbauteilen wesentlich höhere mechanische Toleranzen aufweist.

Gemeinsam mit dem Projektpartner DMG Mori wurden zwei verschiedene Einsatzmöglichkeiten der Mantelheizung diskutiert:

1. Als Nachrüstlösung für die aktuelle LT30 SLM Anlage, in Form einer Bauraumverkleinerung.
2. Als Wechselbehälter mit integrierter Hochtemperatur-Mantelheizung für die neu zu entwickelnde, teilautomatisierte LBM-Anlage.

Die erste Möglichkeit wurde verworfen, da sowohl bei Heraeus als auch bei DMG Mori nicht genug Kapazitäten für Entwicklung und Konstruktion vorhanden waren. Zudem war geplant, die LT30 SLM im Laufe des Projekts durch eine neu zu entwickelnde Anlage zu ersetzen. Aufgrund der starken Verzögerungen im Projekt mussten seitens DMG Mori jedoch alle vorhandenen Ressourcen zur Entwicklung der neuen Anlage aufgewendet werden - dennoch konnte sie während der Projektlaufzeit nicht mehr fertiggestellt werden. Aus diesem Grund konnte auch die zweite Möglichkeit nicht realisiert und weitere Untersuchungen zur Mantelheizung nicht mehr durchgeführt werden.

2.5.6 Befähigung Hardware

Siehe Abschnitt 2.5.2

2.5.7 Temperaturmesstechnik

Dadurch dass sich die Untersuchungen verschiedener Heizmethoden hauptsächlich auf das Top-Heating beschränkten, kamen nur berührungslose Temperaturmessverfahren für die Oberflächentemperatur des Pulverbetts in Frage. Es wurden Infrarot-Kameras und Pyrometer zur Temperaturerfassung verwendet (Details siehe Abschnitt 2.5.2).

Da zum Ende des Projektes keine systematischen Untersuchungen mit dem Top-Heating System an der LT30 SLM Anlage mehr möglich waren, entfiel auch die Untersuchung von Mess- und Regelparametern der Bauraumheizung, sowie deren Auswirkungen auf den Bauprozess.

2.5.8 Systematische Untersuchungen

Aufgrund der umfangreichen Verzögerungen im Projekt war es nicht möglich systematische Untersuchungen mit dem Heizsystem durchzuführen.

-