



KOMBINATION UND INTEGRATION ETABLIERTER TECHNOLOGIEN MIT ADDITIVEN FERTIGUNGS- VERFAHREN

PROJEKT-ABSCHLUSSBERICHT





KOMBINATION UND INTEGRATION ETABLIERTER TECHNOLOGIEN MIT ADDITIVEN FERTIGUNGS- VERFAHREN

PROJEKT-ABSCHLUSSBERICHT



PROJEKTPARTNER



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

BETREUT VOM



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Arbeiten der Projektpartner wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBWF) im Programm „Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen“ mit den Förderkennzeichen 02P15B010 bis 02P15B017 gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

März 2020



DAS GESAMTKONSORTIUM BEIM KICK-OFF-MEETING AN DER UNIVERSITÄT PADERBORN (KAT / DMRC) IM JAHR 2017.

KitkAdd

www.kitkadd.de

SEHR GEEHRTE LESERIN, SEHR GEEHRTER LESER,

die additive Fertigung (3D-Druck) ermöglicht die Herstellung komplexer Bauteilstrukturen, die bislang nicht möglich waren. Es lassen sich beispielsweise bionische Gitterstrukturen in Zahnräder einbringen, die diese leichter und leiser machen. Aufgrund der noch hohen Herstellkosten, werden die Fertigungsverfahren aktuell nur selten in der Serienproduktion angewandt. Hinzu kommt, dass aufgrund fehlender Konstruktionsempfehlungen das Potenzial dieser Fertigungsverfahren nicht voll ausgeschöpft werden kann. Zudem führt die mangelnde Prozessfähigkeit der additiven Verfahren oftmals zu hohem Ausschuss.

Ziel des Forschungsprojekts KitkAdd war deshalb, durch Kombination der additiven Fertigung mit etablierten Fertigungsverfahren, wie Zerspanen, Sintern sowie Spritzgießen, den gesamten Herstellungsaufwand zu senken. Eine neuartige Prozessüberwachung mittels akustischer Sensorik kann nun zusätzlich den entstehenden Ausschuss minimieren.

Zunächst wurden ausgewählte Bauteile der beteiligten Unternehmen herangezogen und analysiert. Dazu gehörten Zahnräder, eine Turbinenschaufel für Gasturbinen, Komponenten für Arbeitsmaschinen sowie Werkzeuge. Die Analyse diente zur Identifikation der Bauteilbereiche, welche beispielsweise durch Gitterstrukturen eine deutliche Verbesserung der Produkteigenschaften durch eine additive Fertigung erreichen. Zur Gestaltung dieser Bauteile wurden dabei Konstruktionsempfehlungen erarbeitet, welche die Angabe von möglichen Fertigungsgenauigkeiten und Restriktionen beinhalten. Weitere Bauteilbereiche wurden anschließend mit etablierten Fertigungsverfahren weiterbearbeitet.

Die Qualitätssicherung konnte durch ein innovatives akustisches Messprinzip verbessert werden, was zukünftig eine Reduktion von Eigenspannungen im Bauteil während der Fertigung gewährleistet und somit den Ausschuss minimieren kann. Für die betrachteten kombinierten Prozessketten wurden zukünftige Fabrikkonzepte zur additiven Fertigung für Großserien entwickelt.

Als Ergebnis liegt nun eine an die additive Fertigung angepasste Konstruktionsmethode vor, die dem Anwender Konstruktionsempfehlungen und erzielbare Fertigungsgenauigkeiten beschreibt. Produkte können damit so gestaltet werden, dass zum Beispiel durch das Einbringen von Gitterstrukturen ein deutlich höherer Produktnutzen erzielt wird. Für die betrachteten Bauteile wurden industrielle Produktionskonzepte erstellt, die im Vergleich zur rein additiven Prozesskette eine wirtschaftlichere Herstellung ermöglichen. Die Reduzierung des Ausschusses im additiven Fertigungsprozess durch das entwickelte Messsystem wird zu einer Etablierung der additiven Verfahren in weiteren Branchen, wie beispielsweise dem Fahrzeugbau sowie dem Maschinen- und Anlagenbau, beitragen. Die Projektergebnisse wurden in entsprechende Standardisierungsgremien eingebracht.

Die Partner in diesem Verbundprojekt wurden im Programm „Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Allen sei an dieser Stelle gedankt, die mit ihrem Wissen, Engagement und ihren Erfahrungen an dieser richtungsweisenden Forschungs- und Entwicklungsarbeit mitgewirkt haben.

STEFAN SCHERR

Projekträger Karlsruhe (PTKA)
Produktion, Dienstleistung und Arbeit
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

VORWORTE



„DAS FORSCHUNGSVORHABEN KITKADD ZIELT AUF DIE ERHÖHUNG DER WIRTSCHAFTLICHKEIT DES LASER POWDER BED FUSION (LPBF) DURCH DIE PRODUKTSPEZIFISCHE KOMBINATION MIT ETABLIERTEN FERTIGUNGSVERFAHREN AB.“

PROF. DR.-ING. GISELA LANZA
Lehrstuhl für Produktionssystem am Karlsruher Institut für Technologie

Additive Fertigungsverfahren erlauben neue technische Vorteile gegenüber etablierten Fertigungsverfahren. Trotzdem sind viele dieser Verfahren bis heute auf Entwicklungsbereiche der Unternehmen und Forschungseinrichtungen begrenzt. Als wesentliche Hemmnisse werden hohe Kosten, geringe Produktivität und unzureichende Prozessfähigkeit der Verfahren gesehen. Das Forschungsvorhaben KitkAdd zielt dabei auf die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit des Laser powder bed Fusion (LPBF) durch die produktspezifische Kombination mit etablierten Fertigungsverfahren ab. Um dies zu erreichen, wurde eine interdisziplinäre Betrachtung der Bereiche Entwicklung, Konstruktion, Prozesskettenintegration und Qualitätssicherung umgesetzt. Die Ergebnisse dieser Zusammenarbeit finden Sie in dieser Veröffentlichung.

Ich danke allen Projektpartnern im KitkAdd-Konsortium, die durch ihr hohes Engagement zu dem Erfolg des Projekts beigetragen haben. Mein Dank gilt weiterhin dem BMBF für die Förderung dieses Projektes sowie dem Projektträger Karlsruhe in Person von Herrn Stefan Scherr für seine Unterstützung.



„DURCH DIE KONSTRUKTIVE ZUSAMMENARBEIT IM PROJEKT KONNTEN UMFANGREICHE ERGEBNISSE ZU VIELEN RELEVANTEN ASPEKTEN ERARBEITET WERDEN, DIE FÜR DIE BEHERSCHUNG DER GESAMTEN PROZESSKETTE UNERLÄSSLICH SIND.“

PROF. DR.-ING. DETMAR ZIMMER
Lehrstuhl für Konstruktions- und Antriebstechnik der Universität Paderborn
Direct Manufacturing Research Center (DMRC)

Die Anwendung der additiven Fertigung zur Herstellung hochfunktionaler und komplexer Strukturen hat sich in den letzten Jahren rasant weiterentwickelt. Gleichwohl bestehen für viele Anwendungsfelder ökonomische Hindernisse, so dass die Kombination mit klassischen Fertigungsverfahren naheliegender ist, mit denen weniger komplexe Bauteilbereiche kostengünstig hergestellt werden können. Diese Kombination erfordert ein tiefgreifendes Verständnis für den gesamten Produktentstehungsprozess – angefangen bei der Konstruktion über die kombiniert additiv und klassisch durchgeführte Fertigung bis hin zur Erzeugung von funktional hochwertigen Endkonturen durch nachgelagerte Endbearbeitungsprozesse. Diesbezüglich konnten im Rahmen des KitkAdd-Projekts durch die konstruktive Zusammenarbeit der Projektpartner umfangreiche Ergebnisse zu vielen relevanten Aspekten erarbeitet werden, die für die Beherrschung der gesamten Prozesskette unerlässlich sind. Die hohe Praxisrelevanz zeigt sich nicht zuletzt durch die erfolgreiche Anwendung der Ergebnisse anhand mehrerer maschinebaulicher Anwendungen.

Ich darf mich an dieser Stelle bei dem BMBF für die Förderung des Projekts und bei allen Projektpartnern für die angenehme Zusammenarbeit bedanken, insbesondere bei Frau Prof. Lanza und Herrn Schäfer für die hervorragende Konsortialführung sowie bei Herrn Scherr für die konstruktive Betreuung durch den Projektträger Karlsruhe.



„DAS IN DIESER VERÖFFENTLICHUNG VORGESTELLTE PROJEKT LIEFERT EINEN ANSATZ DAZU, HYBRIDE, ADDITIVE TECHNOLOGIEKETTEN ABZUBILDEN UND MÖGLICHE PRODUKTIONSWEGE AUFZUZEIGEN INKLUSIVE NEUER KONSTRUKTIONSANSÄTZE“

MARTIN SCHÄFER
Senior Key Expert für AM bei der Siemens AG

In den letzten Jahren hat sich die additive Fertigung beeindruckend entwickelt. Es wurden neue Verfahren entwickelt und viele neue Maschinenhersteller sind auf dem Markt erschienen. Demgegenüber sind Anwendungen in der Industrie eingeschränkt und Arbeiten über die Produktionsintegration dieser Technologie sind gering. Die technischen AM-Umsetzungen sind von externen Dienstleistungsbetrieben und -zentren geprägt. Entscheidende Punkte für die Integration der AM-Verfahren sind die Betrachtung der erweiterten Konstruktionsmöglichkeiten der Produkte, die Zuordnung der technisch möglichen Fertigungstechnologien, die Bewertung der Integration in die Produktion sowie die Evaluierung des Produktlebenszyklus.

Das in dieser Veröffentlichung vorgestellte Projekt liefert einen Ansatz dazu, entsprechende Technologieketten abzubilden und mögliche Produktionswege inklusive neuer Konstruktionsansätze aufzuzeigen. Von Bedeutung für die Industrialisierung der Ergebnisse ist die Darstellung von Demonstratoren. Die vorliegende Projektbeschreibung zeigt dies eindrücklich auf. Anhand der Resultate lassen sich die entwickelten Methodiken und Theorien bewerten und Lösungsansätze ableiten.

Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen Projektpartnern bedanken, durch deren intensive Zusammenarbeit diese erfolgreiche Umsetzung ermöglicht wurde. Mein besonderer Dank gilt dem BMBF für die Förderung unserer Projektidee und dem Projektträger in Person von Herrn Scherr für seine hilfreiche Mitwirkung.

INHALT

GRUSSWORT	5
VORWORTE	7
INHALT	9

1 EINLEITUNG

MOTIVATION, PROJEKTÜBERSICHT	10
VORSTELLUNG DER INDUSTRIEPARTNER	12

2 KONSTRUKTION: THEORIE, FALLSTUDIEN

KONSTRUKTION FÜR REIN ADDITIVE UND HYBRID-ADDITIVE PRODUKTE	14
FALLSTUDIE SIEMENS: AUFBAU AUF GUSS-HALBZEUGEN MITTELS LPBF	22
FALLSTUDIE GKN: KOMBINATION AUS ADDITIVER (LPBF) UND PULVERMETALLURGISCHER (PM) FERTIGUNG ANHAND EINES TOPOLOGIE- OPTIMIERTEN ZAHNRADES	24
FALLSTUDIEN JOHN DEERE: FLUIDFÖRDERUNG UND WÄRMEÜBERTRAGUNG	28

3 PLANUNG: THEORIE, FALLSTUDIEN

PLANUNG UND OPTIMIERUNG HYBRID-ADDITIVER TECHNOLOGIEKETTEN	32
FALLBEISPIEL SIEMENS: DIE GASTURBINENSCHAUFEL IM HYBRIDEN AUFBAU	34
FALLBEISPIEL GKN: ZAHNRADAPPLIKATION MIT GITTERSTRUKTUREN	38
FALLBEISPIEL JOHN DEERE: INNENLIEGENDE ÖLKANÄLE FÜR EIN SONNENRAD	40
FALLBEISPIEL EISENHUTH: HYBRIDGEFERTIGTE SPRITZGUSS- WERKZEUGE	42

4 PROZESSTECHNIK: THEORIE, FALLSTUDIEN

AUFBAU EINER VERSUCHSANLAGE FÜR AKUSTISCHE IN-LINE- ÜBERWACHUNG VON LPBF	46
FALLBEISPIEL H&H: SCHWEIßEN VON LPBF-BAUTEILEN	49
FALLBEISPIEL SCHÜBEL: ADDCASTING	51

5 ZUSAMMENFASSUNG

ÜBERBLICK & AUSBLICK	54
LITERATURVERZEICHNIS	57
IMPRESSUM	58

MOTIVATION & PROJEKTÜBERSICHT

MOTIVATION & ZIELSETZUNG

In der Industrie entsteht aufgrund des dynamischen Wettbewerbsumfelds ein zunehmender Drang nach verkürzten Produktentstehungszeiten, hoher Funktionsintegration und individualisierten Produkten. Mithin erlangen additive Fertigungsverfahren (AM) eine zunehmende industrielle Bedeutung. Das Laser-Strahlschmelzen (LPBF)¹ ist hervorzuheben, da es bereits im Bereich von Kleinserien ein etabliertes Verfahren ist, das an der Schwelle zum Einsatz in der Serienproduktion steht. Wesentliches Hemmnis einer weiteren Verbreitung dieses Verfahrens war die niedrige Wirtschaftlichkeit, welche sich auf drei wesentliche Kriterien zurückführen lässt: Die geringe Produktivität, die unzureichende Prozessfähigkeit sowie die geringe Ausnutzung der gestalterischen Freiheit.

Als Ansatz zur Erhöhung der LPBF-Produktivität sollen hybride Prozessketten aufgebaut und analysiert werden. In diesen Prozessketten sollen nur einzelne funktionelle Bauteilbereiche, in denen LPBF einen Mehrwert bietet, additiv gefertigt werden. Klassische Fertigungsverfahren kommen hingegen dort zum Einsatz, wo sie wirtschaftlicher sind.

Ein weiterer Beitrag zur Erhöhung der Prozessfähigkeit kann durch innovative Messtechnik in der LPBF-Maschine erfolgen. Um die verfügbaren LPBF-charakteristischen Gestaltungsfreiheiten zielgerichtet nutzen zu können, muss ein Optimum aus den verfügbaren Gestaltungsfreiheiten bei simultaner Berücksichtigung existie-

render Anforderungen sowie neuer Restriktionen gefunden werden. Die Entwicklung von innovativen Methoden und Konstruktionsrichtlinien ist eine Möglichkeit, um diese Herausforderung im industriellen Einsatz von hybriden Prozessketten handhabbar zu machen. Das Verbundprojekt zielt auf eine deutlich erhöhte Gesamtproduktivität von LPBF-Prozessketten ab. Das Forschungsvorhaben strebt die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit des LPBF-Verfahrens durch die Kombination mit klassischen Fertigungsverfahren an.

Zusammenfassend wird eine ganzheitliche Sichtweise von der Produktidee bis hin zum Endprodukt verfolgt, indem zielgerichtete Methoden, Konzepte und innovative Messtechnik erarbeitet werden.

DIES ERFOLGT DURCH:

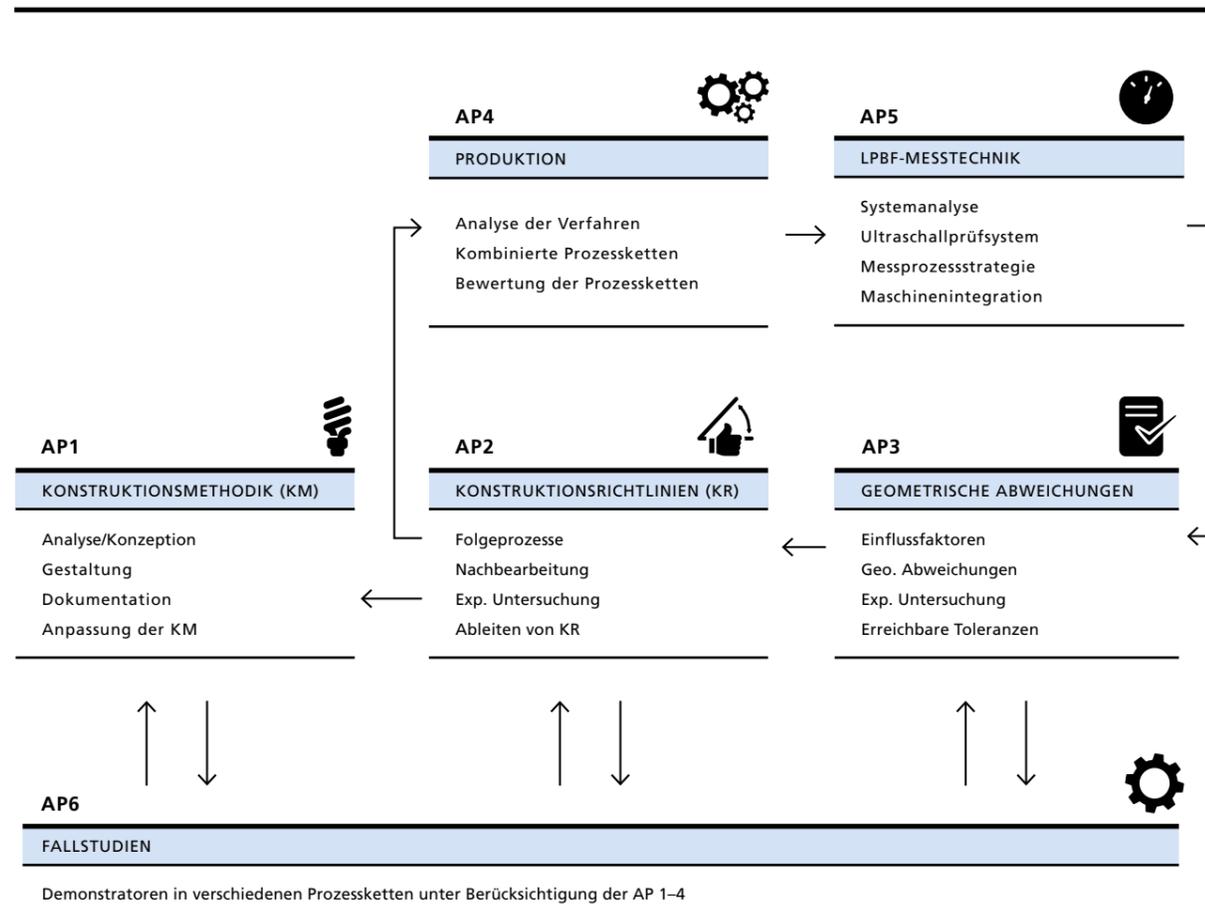
- die integrative Betrachtung der gesamten Prozesskette des LPBF-Verfahrens mit Nach- und Weiterbearbeitung durch klassische Fertigungsverfahren,
- eine für die gesamte LPBF-Prozesskette angepasste Konstruktionsmethodik durch neu entwickelte Konstruktionsrichtlinien sowie erzielbare Fertigungsgenauigkeiten und
- eine für den qualitätskritischen LPBF-Prozess entwickelte Messtechnik zur Bauteilüberwachung während der Fertigung.

Untersuchung entwickelt. Eine anschließende Weiterverarbeitung der Prüfkörper erlaubt eine Bewertung der nachbearbeitungsgerechten Gestalt. Aufbauend auf den experimentellen Ergebnissen werden Konstruktionsrichtlinien für eine nachbearbeitungsgerechte Gestaltung abgeleitet.

Die Untersuchung von geometrischen Abweichungen zielt auf die Festlegung von erreichbaren Form- und Lagetoleranzen für das LPBF-Verfahren ab. In Abhängigkeit von identifizierten Einflussfaktoren und relevanten geometrischen Abweichungen werden geeignete Prüfkörper für die experimentelle Untersuchung entwickelt. Ziel ist es, eine Empfehlung zur Abschätzung der Fertigungsgenauigkeit des LPBF-Verfahrens geben zu können. Basierend auf den experimentellen Untersuchungen werden realistische Toleranzwerte für das LPBF-Verfahren abgeleitet und mit klassischen Herstellungsverfahren verglichen.

Die Methodik zur Planung- und Bewertung hybrider Prozessketten hat das Ziel, einen technischen und wirtschaftlichen Mehrwert für hybrid zu fertigende Produkte zu schaffen. Dazu ist die Produktionsplanungsmethodik mit der Konstruktionsmethodik (AP1) zu verzahnen. Um die Verschiebung von Funktionsträgern in unterschiedlichen Produktionsverfahren bewerten zu können, ist eine umfassende Analyse und modellhafte Abbildung möglicher Prozessketten erforderlich.

Damit der Qualitätsstandard des LPBF-Verfahrens optimiert werden kann, ist es notwendig, qualitätskritische Merkmale bereits während der Fertigung zu erfassen. Dafür muss ein Messsystem entwickelt werden, das die qualitätskritischen Merkmale von LPBF-Bauteilen während der Fertigung erfasst und der Maschinenregelung zur Verfügung stellt. In diesem Zusammenhang soll ein inline Ultraschallsystem entwickelt, in die LPBF-Maschine integriert und hinsichtlich seiner Einsetzbarkeit als Messmittel bewertet werden.



1.1 ÜBERSICHT DER PROJEKTINHALTE

¹ Das Laser-Strahlschmelzverfahren (LPBF) verwendet pulverförmige Metallwerkstoffe als Ausgangsmaterial. Dieses wird schichtweise auf der Bauebene aufgetragen und mittels Laser an den zu verfestigenden Stellen verschmolzen. Dieser Vorgang wird für jede der übereinander liegenden Schichten wiederholt, bis das Bauteil fertiggestellt ist. (Adam 2015)

PROJEKTINHALTE

Zur Erreichung der Ziele wird eine interdisziplinäre Betrachtung der Bereiche Entwicklung, Prozesskettenintegration und Qualitätssicherung im Arbeitspaketplan fokussiert. Zur (Weiter-) Entwicklung einer für additive Fertigungsverfahren angepassten Konstruktionsmethodik (AP1) wird der gesamte Konstruktionsprozess analysiert und modifiziert. Dabei soll die Konstruktionsmethodik mit Inhalten der additiven Fertigung erweitert werden. Dies erfolgt in Anlehnung an die Konstruktionsphasen der VDI-Richtlinie 2221. Die Konstruktionsmethodik soll Funktionsträger sowohl für die LPBF-Prozesskette als auch für die kombinierten Prozessketten berücksichtigen. Empfehlungen für die Grob- und Feingestaltung werden unter Einbezug von Konstruktionsrichtlinien (AP2) und geometrischen Toleranzwerten (AP3) gegeben. Die Allgemeingültigkeit der Konstruktionsmethodik wird anhand der Demonstratoren in AP6 überprüft und validiert.

Die Aufstellung von Konstruktionsrichtlinien (KR) für eine nachbearbeitungsgerechte Gestaltung erfordert eine bedarfsorientierte Identifikation möglicher Folgeprozesse und Bauteilbereiche von Endprodukten sowie Halbzeugen in hybriden Prozessketten. Aus diesen werden repräsentative Prüfkörper für die experimentelle

PARTNER

VORSTELLUNG



Die Eisenhuth GmbH KG verfügt über die drei Kernkompetenzen: Formenbau, Klein- und Mittelserien von Bauteilen aus Kunststoffen sowie die Herstellung von Bipolarplatten. Additive Fertigungsverfahren sind fester Bestandteil der Unternehmenskultur. Das Unternehmen besitzt eigene additive Fertigungsanlagen.



GKN Sinter Metals Engineering GmbH verfügt über langjährige Erfahrung sowohl in der Herstellung von Metallpulvern als auch mit aus Pulver gesinterten Komponenten. Durch den Aufbau einer F&E Abteilung im Bereich Additive Manufacturing ist Erfahrungswissen und Anlagenkapazität vorhanden.



Die Firma H&H ist Dienstleister in der additiven Fertigung von Prototypen und Kleinserienbedarfen. Hierzu gehören die Entwicklung und Simulation, der Prototypenbau, der Lehren- und Vorrichtungsbau, Prototypen- und Serienwerkzeuge sowie Klein- und Exklusivserien. Zu den Vorarbeiten in Forschung und Entwicklung im Bereich additiver Fertigung zählen Marktanalysen bezüglich der technischen und wirtschaftlichen Einsatzpotentiale additiver Fertigungsverfahren.



John Deere qualifiziert sich im Bereich des Laser-Strahlschmelzens durch die Erfahrung aus Bauteilentwicklungsstudien. Die Innovationskultur als einer der vier ausgewiesenen Grundwerte, nimmt für John Deere einen hohen Stellenwert ein. Dies zeigt sich auch im Umgang mit der additiven Fertigung, die beispielsweise in den Anwendungsformen des Rapid Prototyping und Rapid Tooling bereits seit vielen Jahren im Unternehmen etabliert ist.



Das Direct Manufacturing Research Center (DMRC) ist ein interdisziplinäres, fakultätsübergreifendes Forschungsinstitut an der Universität Paderborn. Ziel des DMRC ist es, die additiven Fertigungsverfahren entlang der kompletten Prozesskette, als robustes industrielles Fertigungsverfahren zu etablieren. Hierzu arbeitet ein Industriekonsortium in Kooperation mit der Universität Paderborn zusammen, um die stark disziplinübergreifende Forschung voranzutreiben. Weitere Ziele sind der Wissens- und Technologietransfer, die Qualifizierung des wissenschaftlichen Nachwuchses als auch die Einbringung von Forschungsergebnissen in die universitäre Lehre und Weiterbildung auf dem Gebiet der additiven Fertigungsverfahren.



Der Lehrstuhl KAT beschäftigt sich mit theoretischen und experimentellen Untersuchungen in den Bereichen der elektromechanischen Antriebstechnik und Konstruktion speziell im Bereich der additiven Fertigung. Das Kernziel ist die Optimierung von Bauteilen und Baugruppen durch eine systematische, funktionsorientierte und fertigungsgerechte Konstruktion.



Schübel stellt technische Prototypen aus Metall und Kunststoff her und besitzt die Kernkompetenzen in den Bereichen Rapid Prototyping und Fräsen. Schübel ist weiterhin erfahren in der datengestützten Fertigung von kleinen Stückzahlen sowie Konstruktion und Produktentwicklung.



Siemens kombiniert Kunden- und Daten-Know-how mit der innovativen Fertigungstechnik Additive Manufacturing. Siemens bringt seine Expertise vor allem bei der Materialentwicklung und der Simulation des Fertigungsprozesses ein und ist an der Weiterbildung in der Entwicklungs- und Fertigungs-Community interessiert.



Produktionssystemplanung und Qualitätssicherung zeichnen das wbk als Institut für Produktionstechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) aus. Der Bereich Produktionssysteme beschäftigt sich mit der Fabrikplanung und der Simulation von Produktionssystemen, welche monetär bewertet, simuliert und optimiert werden. Ein Forschungsschwerpunkt ist das Technologiemanagement zur Identifikation von Fertigungstechnologien. Der Bereich Qualitätssicherung befasst sich mit der experimentellen Entwicklung neuer Messtechnik für den LPBF Prozess.

DEMONSTRATOREN

Die industriellen Demonstratoren dienen zum Beweis der exemplarischen Anwendbarkeit der Arbeitsergebnisse. Seitens der Verbundpartner Siemens, GKN, John Deere und Eisenhuth werden reale Produkte zur Verfügung gestellt, von denen durch den LPBF-Fertigungsprozess technische und wirtschaftliche Optimierungspotenziale erwartet werden. Die Verbundpartner stellen dabei Produkte in unterschiedlichen Entwicklungsstadien bereit, so dass die Konstruktions- und Produktionsplanungsmethoden in unterschiedlichen Planungsphasen realisiert werden können.



SIEMENS

Im Anwendungsfall von Siemens wird die Kombination von Fertigungsverfahren zwischen LPBF und Feinguss anhand einer **TURBINENSCHAUFEL** für eine stationäre Gasturbine betrachtet. Durch die erarbeitete Methodik sollen mehrere potentielle, kombinierte Prozessketten erarbeitet werden. Die klassische Fertigung sieht die Herstellung im Feinguss vor. Durch die Methodik zur hybriden Prozesskette soll geprüft werden, welche Bauteilbereiche im Feinguss und welche im LPBF-Fertigungsverfahren in einer kombinierten Prozesskette wirtschaftlich hergestellt werden können.



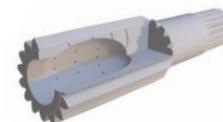
GKN

Der Anwendungsfall von GKN ist ein **ZAHNRAD**, welches klassisch im pulvermetallurgischen Sinterprozess (PM-Sintern) hergestellt wird. Für dieses Projekt werden interne Hohlstrukturen, die mit dem LPBF-Verfahren realisiert werden, in einer hybriden Prozesskette mit dem PM-Sintern umgesetzt. Zahnräder, die ein Kernelement mechanischer Antriebe darstellen, sollen dadurch Masse einsparen und über ein besseres Geräuschkämpfungsverhalten verfügen, ohne maximal übertragbare Momente reduzieren zu müssen. Neben der technischen Machbarkeit in der Serie sollen monetäre Bewertungen der hybriden Prozessketten anhand des Demonstrators durchgeführt werden.

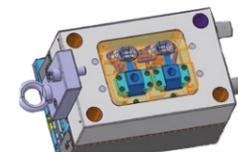


JOHN DEERE

Der erste Anwendungsfall von John Deere befindet sich in einer besonders frühen Phase der Produktentwicklung. Es existiert ein klassischer **KRAFTSTOFFKÜHLER** aus dem Bereich der Thermo- und Fluidodynamik, der in einer reinen LPBF-Prozesskette hergestellt werden soll. Kernfunktionen dieses Bauteils ist die Durchströmung von flüssigen Medien und der Übertragung thermischer Energie. Optimierungspotentiale dieses Bauteils sind die Reduzierung von Strömungsverlusten, die Erhöhung des Wirkungsgrades sowie die Minimierung des Bauteilvolumens und -gewichts.



Der zweite Anwendungsfall des Unternehmens stellt ein **SONNENRAD** aus einem Planetenradgetriebe dar. Dabei sollen additiv gefertigte Bauteilbereiche dafür sorgen, eine verbesserte Schmierfunktion durch Ausnutzung von Fliehkrafteffekten umzusetzen. Durch die Kombination eines klassischen Schmiedeprozesses mit dem LPBF-Prozess soll eine wirtschaftliche Serienfertigung ermöglicht werden. Die Prozesskette des hybriden Sonnenrads soll unter Betrachtung technischer und wirtschaftlicher Kriterien bewertet und optimiert werden.



EISENHUTH

Das Unternehmen Eisenhuth stellt ein Bauteil aus dem Bereich Rapid Tooling zur Verfügung. Es sollen **SPRITZGUSSEINSÄTZE** durch den LPBF-Prozess hergestellt werden, um eine konturnahe und effizientere Kühlung des Kunststoffbauteils sicherzustellen. Der Fokus der Optimierung liegt auf der Geometrie der Kühlkanäle und der Reduzierung der Taktzeiten im Spritzgussprozess. Forschungsschwerpunkt ist die funktions-, fertigungs- und nachbearbeitungsgerechte Gestaltung von LPBF-Bauteilen.

KONSTRUKTION FÜR REIN ADDITIVE UND HYBRID-ADDITIVE PRODUKTE

Um die Produktivität und die Robustheit der Fertigungsvorgänge im LPBF allein und in hybriden Prozessketten zu verbessern, spielt die Konstruktion und Gestaltung von Bauteilen für die additive Fertigung eine entscheidende Rolle. Daher sind klar definierte Handlungsempfehlungen und methodische Vorgehensweisen zu definieren. Neben der Verbesserung der Bauteilfunktion werden die fertigungs-, nachbearbeitungs-, toleranzgerechte Gestaltung immer wichtiger. Daher ist die Grundlagenforschung ein wichtiger Aspekt bei der Betrachtung vertikaler und horizontaler Prozessketten. Das Projekt beschäftigt sich im Bereich der Konstruktion besonders mit folgenden Punkten:

- **Konstruktionsmethodik (z.B. Berücksichtigung der Vor- und Nachteile von AM sowie der Integration von hybriden Prozessketten)**
- **Fertigungsgerechte Gestaltung (z.B. Konstruktionsrichtlinien sowie Handlungsempfehlungen für den hybriden Aufbau von Halbzeugen)**
- **Nachbearbeitungsgerechte Gestaltung (z.B. Stützstrukturentfernung, Aufmaßbestimmung für spanende Nachbearbeitung, Strömungsgleitschleifen für innenliegende Strukturen)**
- **Toleranzgerechte Gestaltung (z.B. Ermittlung der Fertigungsgenauigkeiten, Angabe von realistischen Toleranzwerten im Bereich der Form- und Lageabweichungen)**

Dazu wurden umfangreiche theoretische und experimentelle Untersuchungen durchgeführt, die die notwendigen Handlungsempfehlungen und quantitativen Kennwerte für die Konstruktion bereitstellen. Zur Validierung der Ergebnisse dienten die industrieseitig bereitgestellten Demonstratoren in unterschiedlichen Konstruktionsphasen. Im Folgenden werden ausgewählte Untersuchungen näher erläutert.

KONSTRUKTIONSMETHODIK

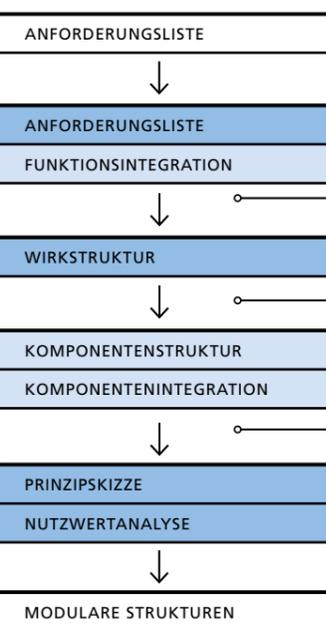
Um einen technisch und wirtschaftlich sinnvollen Einsatz der additiven Fertigungsverfahren zu ermöglichen und die Produktentwicklung zielgerichtet dazu auszurichten, erfolgte eine Anpassung und Ergänzung bestehender Konstruktionsmethodiken. Bei der Umkonstruktion und Neuentwicklung von Bauteilen und Baugruppen wird dadurch eine Anleitung gegeben zur Berücksichtigung der Vorteile und Restriktionen der additiven Fertigungsverfahren. Weiterhin soll gezielt Rücksicht auf die additiven Verfahren bei der Auswahl des Fertigungsverfahrens innerhalb der Konstruktionsmethodik genommen werden.

ENTWICKLUNG EINER ANGEPASSTEN KONSTRUKTIONSMETHODIK FÜR AM

Die AM-Konstruktionsmethodik gliedert sich in den an die additive Fertigung angepassten Konstruktionsprozess (AM-Konstruktionsprozess) und in das bewertungsmethodische Vorgehen (vgl.

AM-KONSTRUKTIONSMETHODIK

AM-KONSTRUKTIONSPROZESS



BEWERTUNGSMETHODISCHES VORGEHEN



■ Neuer Schritt ■ Schritt angepasst

2.1 BEWERTUNGSMETHODISCHES VORGEHEN IM AN AM ANGEPASSTEN KONSTRUKTIONSPROZESS

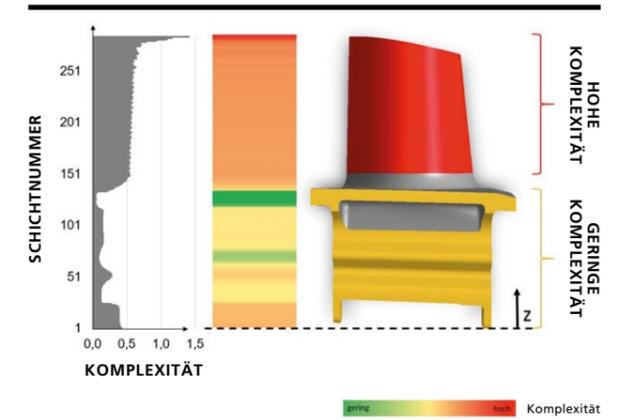
Abbildung 2.1). Der AM-Konstruktionsprozess und das neu entwickelte bewertungsmethodische Vorgehen laufen parallel ab. Der AM-Konstruktionsprozess kann sowohl mit als auch ohne bewertungsmethodisches Vorgehen durchlaufen werden. Allerdings unterstützt das bewertungsmethodische Vorgehen bei der möglichst frühzeitigen Festlegung des Fertigungsverfahrens.

Die Konstruktion von additiv zu fertigenden Bauteilen wird ohne Erfahrungen über diese Fertigungsverfahren erleichtert. Für den AM-Konstruktionsprozess wurde als Basis die Richtlinie VDI 2221 verwendet. Die Schritte der Richtlinie wurden hinsichtlich additiver Fertigungsverfahren untersucht und mit Anleitungen, Hinweisen sowie Vorgehensweisen für die Konstruktion erweitert. Außerdem wurden neue Schritte sowohl in die Konzeptionsphase als auch in die Entwurfsphase eingefügt, z.B. die Funktionsintegration oder die Komponentenstruktur. Die vorgenommenen Änderungen bedingen eine Anpassung der Produktarchitektur additiv gefertigter Bauteile. Die hinzugefügten Schritte wurden speziell auf die Potentiale additiver Fertigungsverfahren zugeschnitten. Eine Konstruktion konventionell zu fertigender Bauteile wird aber nicht außer Acht gelassen. Mit der AM-Konstruktionsmethodik ist eine Aufgeschlossenheit gegenüber allen Fertigungsverfahren additiv, hybrid und konventionell gewährleistet.

Die an die additive Fertigung angepasste Konstruktionsmethodik (AM-Konstruktionsmethodik) kann genutzt werden, um Bauteile direkt unter Berücksichtigung der Potentiale und Restriktionen der additiven Fertigung zu entwickeln. Durch die Erweiterung der Konstruktionsmethodik kann frühzeitig im Konstruktionsprozess die Eignung konventioneller und / oder additiver Fertigungsverfahren zur Herstellung von Bauteilen ermittelt werden. Hierunter wird auch eine kombinierte oder hybride Fertigung (Kombination aus konventionellen und additiven Fertigungsverfahren) verstanden. Dies gilt für komplette Neukonstruktionen, bei denen konventionelle und additive Fertigungsverfahren in Betracht kommen, aber auch für Anpassungskonstruktionen von Bauteilen für die additive Fertigung. Daher soll möglichst früh im Konstruktionsprozess feststehen, ob ein Bauteil additiv, konventionell oder hybrid gefertigt wird. In der Regel wird allerdings das Fertigungsverfahren erst im Entwurf festgelegt.

Das bewertungsmethodische Vorgehen basiert auf dem angepassten Konstruktionsprozess und greift bis zum Skizzieren der Prinziplösung nach jedem Arbeitsschritt in den Prozess ein, um die Bewertung der Eignung additiver Fertigungsverfahren vorzunehmen. So wird die Lösungsalternative, die additiv gefertigt werden soll (AM-Lösungsalternative), entsprechend dem angepassten Konstruktionsprozess entwickelt und mit dem bewertungsmethodischen Vorgehen bewertet. Um den AM-Konstruktionsprozess auch ohne das bewertungsmethodische Vorgehen anwenden zu können, werden in diesem Hinweise gegeben, wie frühzeitig festgestellt werden kann, ob eine additive Fertigung sinnvoll ist.

Falls von vorneherein feststeht, dass ein Bauteil additiv gefertigt werden soll, kann der AM-Konstruktionsprozess ohne das bewertungsmethodische Vorgehen durchlaufen werden. In diesem Fall finden die eben genannten Hinweise keine Beachtung. Wenn aber unklar ist, ob eine additive Fertigung sinnvoll ist, wird empfohlen nach dem bewertungsmethodischen Vorgehen zu verfahren. Dies ist nach der Konzeptionsphase abgeschlossen und der AM-Konstruktionsprozess wird weiter durchlaufen.



2.2 SCHICHTWEISE KOMPLEXITÄTSBETRACHTUNG DER TURBINENSCHAUFEL

Die AM-Konstruktionsmethodik wurde anhand einer Turbinenschaufel zusammen mit der Siemens AG validiert. Die Turbinenschaufel wurde bereits von der Siemens AG als hybrid zu fertigendes Bauteil entwickelt. Aus dem bewertungsmethodischen Vorgehen hat sich ergeben, dass eine additive Fertigung für die Turbinenschaufel besser geeignet ist als eine konventionelle Fertigung. Damit hat das bewertungsmethodische Vorgehen ein korrektes Resultat geliefert und erweist sich als anwendbar. Die beiden Schritte, Bestimmung der Komplexität und hybride Fertigung, haben sich bei der Validierung als erfolgreich herausgestellt. Im Zuge des AM-Konstruktionsprozesses konnte über die Berechnung der Komplexität der Turbinenschaufel (vgl. Abbildung 2.2) nachgewiesen werden, dass eine hybride Fertigung geeignet ist.

KONSTRUKTIONSRICHTLINIEN FÜR EINE FERTIGUNGSGERECHTE GESTALTUNG

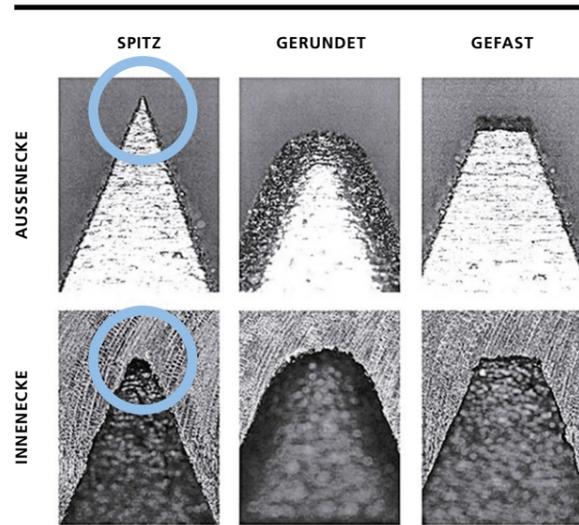
Die am Lehrstuhl für Konstruktions- und Antriebstechnik (KAT) und am Direct Manufacturing Research Center (DMRC) erarbeitete Methodik zur systematischen Erarbeitung von Konstruktionsrichtlinien von ADAM wurde angewendet, um das Material Inconel 718 für den Anwendungsfall der Siemens AG zu charakterisieren [Ada15].

MOTIVATION UND ZIELSETZUNG

Innerhalb dieser Untersuchung sollen gestalterische Restriktionen des additiven Fertigungsverfahrens LPBF erforscht werden. Die abgeleiteten Konstruktionsrichtlinien sollen eine fundierte Basis bilden, um die gestalterischen Freiheiten und Restriktionen vermitteln zu können.

PROBLEMLÖSUNG

Innerhalb der Methode von Adam 2015 wurden Standardelemente definiert, die eine hohe technische Relevanz darstellen. Jedes Standardelement wird über Attribute definiert. Das Standardelement „Wand“ bekommt z.B. das Attribut „Wanddicke“, welches in unterschiedlichen numerischen Werten ausgeprägt sein kann. Die Standardelemente gliedern sich neben Basiselementen in Elementübergänge und aggregierte Strukturen [Ada15]. Nach der Herstellung werden Ist-Ausprägungen der Attribute an einfachen Prüfkörpern mit festgelegten Messmethoden aufgenommen und interpretiert. Daraus resultierend wird ein Konstruktionsrichtlinienkatalog für das Material Inconel 718 aufgebaut.



2.3 QUALITATIVE BEWERTUNG DES ATTRIBUTS „ECKE“ AN ELEMENTÜBERGÄNGEN

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG UND ABLEITEN VON KONSTRUKTIONSRICHTLINIEN

Die experimentelle Untersuchung besteht aus der Prüfkörperfertigung und der Qualitätsprüfung. Neben quantitativen Auswertungen erfolgten ebenfalls die qualitative Analyse von Prüfkörpern. Bei qualitativen Untersuchungen wurde beispielsweise die Ausprägung von Ecken genauer betrachtet (vgl. Abbildung 2.3). Es zeigte sich beispielsweise, dass Rundungen und Fasen deutlich präziser gefertigt werden können als spitze Ecken.

Tabelle 2.5 stellt einen Auszug aus den quantitativen Ergebnissen des Konstruktionsrichtlinienkatalogs dar. Dabei werden die Grenzwerte der geometrischen Attribute für die jeweiligen Standardelemente gegenübergestellt. Qualitative Ergebnisse, die den Konstruktionsrichtlinienkatalog auf insgesamt 55 Konstruktionsrichtlinien komplementieren, werden an dieser Stelle nicht aufgelistet. Mit den durchgeführten Untersuchungen zur fertigungsgerechten Gestalt, konnte der bestehende Konstruktionsrichtlinienkatalog nach [Ada15] um das Material Inconel 718 erweitert werden. Die Konstruktionsrichtlinien wurden im Projekt zur Gestaltung von Prüfkörpern und Demonstratoren genutzt und legen die Grundlage im Bereich des Entwerfens für das LPBF-Verfahren.

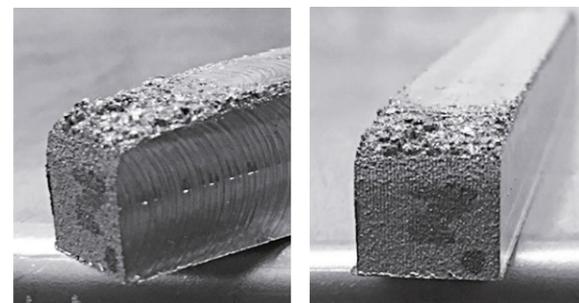
ELEMENTGRUPPE	ELEMENTTYP	ATTRIBUT	GRENZWERT
BASISELEMENT	Nicht gekrümmt	Wanddicke d	≥ 0,6 mm
	Einfach gekrümmt	Außenradius r _a	≥ 0,3 mm
	Doppelt gekrümmt	Außenradius r _a	≥ 0,3 mm
ELEMENTÜBERGÄNGE	Spalt	Spaltbreite b _{sp}	≥ 0,1 mm
AGGREGIERTE STRUKTUREN	Überhang	Überhanglänge l _{Üh}	≤ 2,0 mm
	Oberfläche ohne Support	Oberflächenwinkel β _{of}	≥ 25°

2.5 AUSZUG DES KONSTRUKTIONSRICHTLINIENKATALOGS MIT QUANTITATIVEN ANGABEN

KONSTRUKTIONSRICHTLINIEN FÜR EINE NACHBEARBEITUNGSGERECHTE GESTALTUNG

Für die Erarbeitung der Konstruktionsrichtlinien für eine nachbearbeitungsgerechte Gestalt werden unterschiedlich große Quader mittels LPBF aus Edelstahl 316 L (1.4404) gefertigt. Die Quader weisen eine konstante Querschnittsfläche von 10 x 10 mm² auf. Das dritte Nennmaß variiert zwischen 10 und 80 mm. Die Untersuchung soll Aufschluss über notwendige Aufmaße für eine spanende Nachbearbeitung geben. Neben dem variierenden Nennmaß werden die Orientierung (0°, 45° und 90°) sowie die Supportart (Block- und Kegelsupport) untersucht. Zur Bestimmung der notwendigen Aufmaße werden die Istmaße vor und nach dem Fräsen mittels einer Bügelmessschraube ermittelt. Im Fräsvorgang wird solange zugestellt, bis keine sichtbare Oberfläche aus dem LPBF-Prozess vorhanden ist. Die Prüfkörper werden dazu von allen Seiten spanend bearbeitet. Der Soll-Ist-Vergleich zwischen den theoretischen und nachbearbeiteten Abmessungen gibt Aufschluss über die notwendigen Aufmaße für die spanende Fertigung.

Nach Herstellung der Prüfkörper können einige Auffälligkeiten beobachtet werden. Die unter 0° gefertigten Prüfkörper zeigen einen starken Verzug an der Prüfkörperunterseite auf. Besonders nehmen diese Verzüge mit der Zunahme der Nennlänge zu, was durch den Curling-Effekt zu begründen ist, vgl. Abbildung 2.4. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei der Herstellung von LPBF-Bauteilen, die geringsten Aufmaße unter einer Orientierung von 90° (größtes Nennmaß in z-Richtung) benötigt werden. Ein erhöhtes Aufmaß muss bei 45° (größtes Nennmaß unter 45° zur Bauplattform orientiert) berücksichtigt werden. Unter 0° (größtes



2.4 AUSWIRKUNG DES CURLING-EFFEKTS AN DER PRÜFKÖRPER-UNTERSEITE (NENNLÄNGE 80 MM/ORIENTIERUNG 0°/BLOCKSUPPORT)

NENNMASS [mm]	AUFMASSE [mm]			
	x – y-EBENE		z-RICHTUNG	
	BLOCK	BLOCK – KEGEL	BLOCK	BLOCK – KEGEL
10	0,43	0,52	0,37	0,20
30		0,40	0,12	0,18
50	0,40	0,35	0,23	0,17

2.6 NOTWENDIGE AUFMASSE FÜR DIE SPANENDE FERTIGUNG IN DER 90°-ORIENTIERUNG

Nennmaß in x- oder y-Richtung) sind die größten Aufmaße erforderlich. Eine Verbesserung zeigt die Supportkombination von Block- und Kegelsupport.

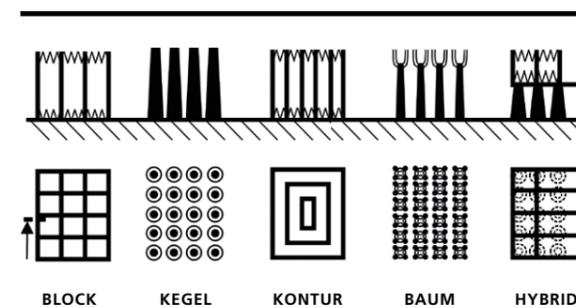
Die folgende Tabelle listet die notwendigen fertigungsbedingten Aufmaße für die spanende Fertigung in Abhängigkeit der Nennmaße, Supportarten und Richtungen. Exemplarischen werden die Aufmaße in der 90°-Orientierung aufgezeigt (vgl. Abbildung 2.6).

NACHBEARBEITUNGSGERECHTE GESTALTUNG (ENTFERNBARKEIT STÜTZSTRUKTUREN)

Stützstrukturen haben einen wesentlichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit sowie die Produktivität des LPBF. Sie sind für die Fertigung von Bauteilen unerlässlich und dienen zur Fixierung der Bauteile sowie zur Ableitung von Wärme während der Fertigung. Ein Nachteil ist, dass die Stützstrukturen nach der Herstellung vom Bauteil entfernt werden müssen. So führen Stützstrukturen zu einem erhöhten Materialverbrauch, einer Verlängerung der Fertigungszeit und einer notwendigen Nachbearbeitung der Bauteile. Ziel ist die Entwicklung von Konstruktionsrichtlinien zur nachbearbeitungsgerechten Gestaltung. Sie ermöglichen eine einfache Auswahl von Stützstrukturen und die Bestimmung von Kenngrößen für die Stützstrukturen hinsichtlich Kosten, Qualität und Zeit.

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

Zur Entwicklung von Konstruktionsrichtlinien für Stützstrukturen werden zunächst verschiedene Geometrien (Block-, Kegel-, Baum-, Kontur- und Hybridstrukturen) ausgewählt (vgl. Abbildung 2.7). Darüber hinaus werden die geometrischen Parameter der jeweiligen Stützstruktur so variiert, dass das erforderliche Volumen der



2.7 UNTERSUCHTE STÜTZSTRUKTUREN

Stützstruktur beeinflusst und der Verbindungsbereich der Stützstruktur zum Bauteil verändert wird. Dies sind Werte wie beispielsweise der Durchmesser von Baum- und Kegelstrukturen sowie vorgegebene Abstände der einzelnen Stützstrukturelemente zueinander (Mindestabstand, Hatchabstand und Konturversatz im Blocksupport).

PRÜFKÖRPER

Eine quaderförmige Geometrie (15 mm x 15 mm x 5 mm) wurde verwendet, um mögliche Verzugsprobleme durch Asymmetrie zu vermeiden und die Nachbearbeitung durch ebene Kontaktflächen zu vereinfachen. Für die einzelnen Stützstrukturen wird eine Stützhöhe von 4 mm als Standardhöhe der Stützstrukturen unterhalb der Prüfkörperunterseite verwendet. Die Prüfkörper werden mit dem LPBF-Verfahren aus dem Edelstahl 316L (1.4404) hergestellt.

BEWERTUNG DER STÜTZSTRUKTUREN

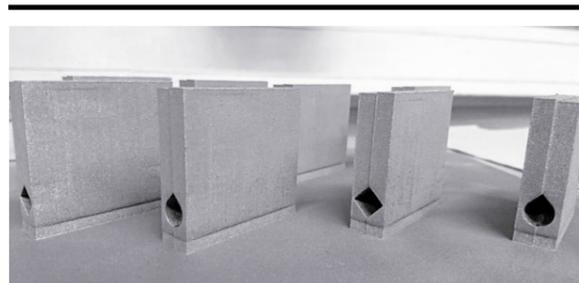
Die Bewertung der Stützstrukturen erfolgt anhand vier verschiedener Kriterien:

- **Stützstrukturvolumen,**
- **Entfernungszeit,**
- **die Oberflächenrauheit der Prüfkörperunterseite und**
- **Verformung der Oberseite des Prüfkörpers.**

Der Materialverbrauch für die verschiedenen Stützstrukturen wird aus der Vorbereitungssoftware abgeleitet. Diese Werte werden verwendet, um die Stützstruktur auf Grundlage ihrer Kosten zu bewerten. Nach der Herstellung werden die Prüfkörper von der Bauplattform entfernt und anschließend die Stützstruktur definiert vom Prüfkörper getrennt. Zur Bewertung der Stützstrukturen hinsichtlich der Verzugseigenschaften wird die Verformung der Prüfkörperoberseite gemessen. Die qualitative Entfernbarekeit der Stützstruktur vom Bauteil wird über die Oberflächenrauheit an der Prüfkörperunterseite nach dem Entfernen der Stützstruktur bewertet.

Nachfolgend werden exemplarisch Ergebnisse der vier Bewertungskriterien für den Stützparameter „Hatchabstand“ des Blocksupport angegeben. Der Hatchabstand ist der Abstand zwischen den Wänden innerhalb des Blocksupports.

- **Wenn der Hatchabstand erhöht wird, können sowohl der Materialverbrauch als auch die Herstellungszeit reduziert werden.**



2.8 PRÜFKÖRPER AUS INCONEL 718 NACH DER LPBF-HERSTELLUNG

- Wenn der Hatchabstand erhöht wird, kann die Nachbearbeitungszeit reduziert werden.
- Wenn der Hatchabstand minimiert wird, wird die Oberflächenrauheit auf der Supportfläche verringert.
- Der Verzug wird bei einem Hatchabstand von 2 mm minimiert. Bei einer weiteren Erhöhung des Hatchabstands nimmt der Verzug nicht signifikant zu.

Dies ermöglicht die Ableitung von zwei Konstruktionsrichtlinien für eine geeignete nachbearbeitungsgerechte Gestaltung von Blocksupport:

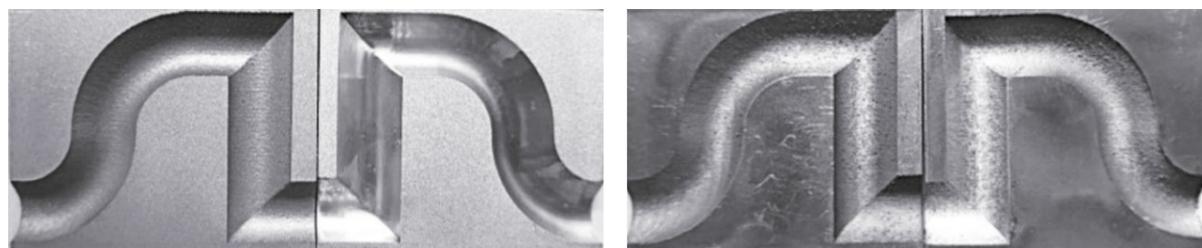
- Für eine kosten- und zeiteffiziente Gestaltung von Blocksupport sollte der Hatchabstand maximiert werden.
- Die Oberflächenqualität eines Bauteils kann durch die Verwendung eines Hatchabstands von 2 mm erhöht werden.

STRÖMUNGSGLEITSCHLEIFEN VON INNENLIEGENDEN STRUKTUREN

MOTIVATION UND ZIELSETZUNG

Oftmals werden durch das LPBF komplexe, innenliegende Kanäle gefertigt, bei denen die Zugänglichkeit nicht gegeben ist, um sie durch einen spanenden Fertigungsprozess zu bearbeiten. Das Strömungsgleitschleifen bietet die Möglichkeit der mechanischen Nachbearbeitung von innenliegenden Geometrien. Dazu werden abrasive Medien durch die nachzubearbeiten Geometrien geströmt, wodurch die Oberflächen geglättet werden.

Innerhalb dieser Untersuchung soll das Potential dieser Nachbearbeitungsmethode identifiziert werden. Hierzu wurden Prüfkörpergeometrien festgelegt, in denen ein in unterschiedlichen Orientierungen laufender Kanal mit vier unterschiedlichen Querschnitten (kleine und großer Kreis, Raute sowie Tropfenform) analysiert wird (vgl. Abbildung 2.8).



2.9 LINKS – ALSI10MG IN ASBUILT UND GESCHLIFFEN; RECHTS – INCONEL 718 IN ASBUILT UND GESCHLIFFEN

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG

Innerhalb des LPBF werden dazu die Materialien AlSi10Mg und Inconel 718 untersucht. Nach dem Strömungsgleitschleifen werden die Prüfkörper mittig auf erodiert, um den inneren Kanal hinsichtlich der erzielbaren Oberflächenrauheit vermessen zu können. Die resultierende Oberflächenrauheit vor und nach dem Strömungsgleitschleifen gibt Aufschluss über die Nachbearbeitungsmethode. Der optische Vergleich der Kanäle bei AlSi10Mg verdeutlicht, dass die charakteristische Oberflächenrauheit des LPBF-Prozesses deutlich minimiert werden kann. Das deutlich härtere und hochfeste Inconel 718 zeigt zwar eine leichte Aufhellung nach dem Strömungsgleitschleifen, allerdings wird nur eine geringe Reduzierung der Oberflächenrauheit erreicht (vgl. Abbildung 2.9).

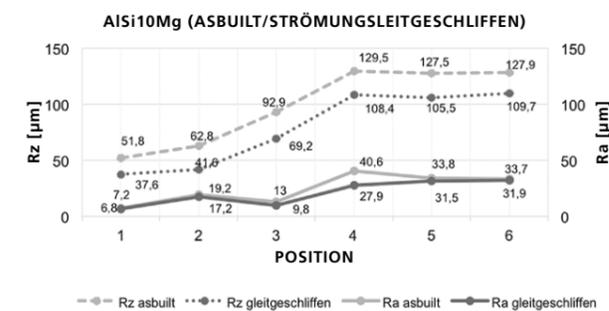
Zum quantitativen Vergleich wurde die Oberflächenrauheit an sechs verschiedenen Stellen, die unterschiedliche Orientierungen von Flächen repräsentieren, mittels eines optischen Makroskops ermittelt. Die Ergebnisse werden in Abbildungen 2.10 und 2.11 für AlSi10Mg und Inconel 718 dargestellt. Es zeigt sich, dass AlSi10Mg deutlich geringere Oberflächenrauheiten im asbuilt-Zustand aufweist als das Material Inconel 718. Weiterhin ist ersichtlich, dass wie bereits beim optischen Eindruck zu sehen, die Abtragung durch das Strömungsgleitschleifen bei AlSi10Mg deutlich höher ist, wodurch ebenfalls eine signifikante Abnahme der Rauheitswerte zu erkennen ist.

Zusammenfassend konnte das Strömungsgleitschleifen als eine geeignete Methode zur Nachbearbeitung von innenliegenden Kanälen identifiziert werden. Zu beachten ist allerdings, dass die Abtragungs- und Glättungsraten stark von den Härten und Festigkeiten des Materials abhängen.

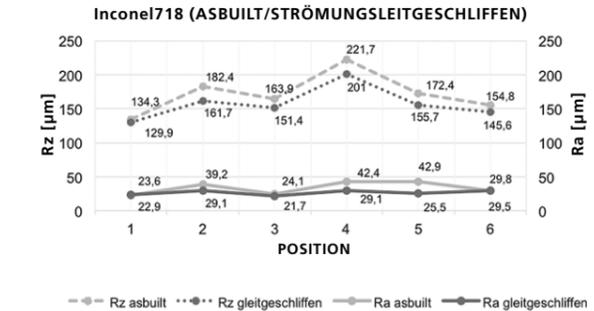
FERTIGUNGSGENAUIGKEITEN : EINE METHODE ZUR BESTIMMUNG GEOMETRISCHEN TOLERANZWERTEN

MOTIVATION UND ZIELSETZUNG

Die geometrische und materielle Freiheit ist einer der wichtigsten Vorteile, die durch die schichtweise Herstellung in der additiven Fertigung erzielt wird. Aufgrund dieses Prinzips reduzieren additive Fertigungsverfahren die 3D-Komplexität von Bauteilen in herstellbare 2D-Schichten. Trotz der Vorteile ist die Verwendung von AM zur Herstellung von Endbauteilen begrenzt. Der Grund dafür ist, dass unterschiedliche prozessspezifische Herausforderungen, wie raue Oberflächen, die industrielle Etablierung hemmen. In diesem Zusammenhang ist die geometrische Genauigkeit ein wichtiges Qualitätsmerkmal und eine große Herausforderung für AM.



2.10 EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE FÜR DAS MATERIAL ALSI10MG VOR UND NACH DEM STRÖMUNGSGLEITSCHLEIFEN AN SECHS VERSCHIEDENEN MESSPOSITIONEN IM KANAL



2.11 EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE FÜR DAS MATERIAL INCONEL718 VOR UND NACH DEM STRÖMUNGSGLEITSCHLEIFEN AN SECHS VERSCHIEDENEN MESSPOSITIONEN IM KANAL

STAND DER TECHNIK – GEOMETRISCHE ABWEICHUNGEN UND TOLERANZEN

Geometrische Abweichungen sind aufgrund der physischen Herstellung von Bauteilen unvermeidbar und können im Allgemeinen in vier Kategorien unterteilt werden. Die vier Kategorien sind Maßabweichungen (Zweipunktabmessungen), Formabweichungen (z. B. Rundheit oder Zylindrizität), Lageabweichungen (z. B. Rechtwinkligkeit) und Oberflächenabweichungen (z. B. Oberflächenrauheit). Eine Beschreibung der Geometrie mit Maß- und Oberflächentoleranzen ist jedoch nicht ausreichend. Daher konzentriert sich dieser Beitrag zudem auf die Form- und Lageabweichungen.

METHODENENTWICKLUNG

Um geometrische Toleranzwerte für AM zu ermitteln, haben das „Direct Manufacturing Research Center“ (DMRC) und der „Lehrstuhl für Konstruktion und Antriebstechnik“ (KAT) der Universität Paderborn in vorherigen Schritten begonnen, Maßabweichung zu untersuchen. In diesem Beitrag wird diese Methode auf Form- und Lageabweichungen erweitert. Basierend auf den ersten Ergebnissen sollen erreichbare Toleranzen systematisch ermittelt werden. Für die systematische Untersuchung von Abweichungen ist eine

Methode erforderlich, die wichtige Aspekte bei der Ermittlung von Toleranzwerten berücksichtigt. Neben der Identifizierung relevanter Faktoren, die die geometrische Genauigkeit beeinflussen, werden Variationsschritte für jeden Faktor, verschiedene Prüfkörper und geeignete Messmethoden definiert.

GEOMETRISCHE EINFLUSSFAKTOREN

Die geometrischen Faktoren beschreiben die Gestalt und die räumliche Position von Bauteilen innerhalb des AM-Bauraums. Im Folgenden werden die geometrischen Faktoren und ihre festgestellten Variationsschritte vorgestellt.

Nennmaß:

3 mm bis 500 mm nach DIN EN ISO 286-1

Dimensionsgruppe:

Außen-, Innen-, Abstands- und Stufenmaße

Elementgeometrie:

Nicht-, einfach-, doppelgekrümmte Elemente und deren Kombination [Ada15]

Orientierung und Ausrichtung:

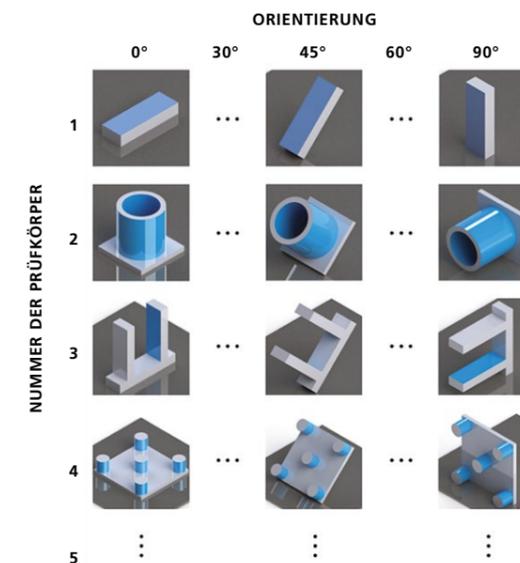
Maßtoleranzen: Nennmaße entlang der x-, y- und z-Achsen des Bauraums / Form- und Lageabweichungen: Nennmaße in 0°, 30°, 45°, 60° und 90°-Orientierung

Position im AM-Bauraum:

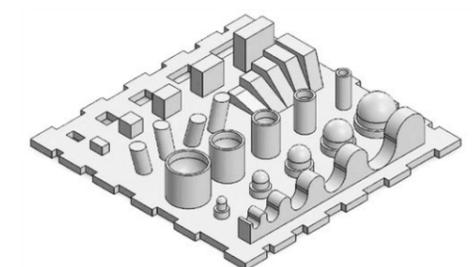
Neun Positionen in der x-y Ebene und drei Ebene entlang der z-Achse

ENTWICKLUNG VON PRÜFKÖRPERN

Anhand der definierten Einflussfaktoren und der relevanten geometrischen Abweichungen wurden Prüfkörper entwickelt, um die Fertigungsgenauigkeit zu untersuchen. Neben einfachen Platten zur



2.12 UNTERSCHIEDLICH ORIENTIERTE EINZELPRÜFKÖRPER ZUR AUFNAHME VON GEOMETRISCHEN ABWEICHUNGEN MIT ALLEN VARIATIONSSCHRITTEN DER RELEVANTEN EINFLUSSFAKTOREN



2.13 UNIVERSELLER PRÜFKÖRPER ZUR ERMITTLUNG VON GEOMETRISCHEN ABWEICHUNGEN MIT EINGESCHRÄNKTEN VARIATIONSSSTUFEN DER RELEVANTEN EINFLUSSFAKTOREN

EINZEL-PRÜFKÖRPER	DURCHMESSER D	LÄNGE L	ORIENTIERUNG O
Nr. 2: "Hohlzylinder"	Ø 10 mm	10 mm	0°
	Ø 18 mm	18 mm	45°
	Ø 30 mm	30 mm	90°

2.14 PRÜFKÖRPER NR. 2: HOHLZYLINDER MIT VARIATIONSSTUFEN

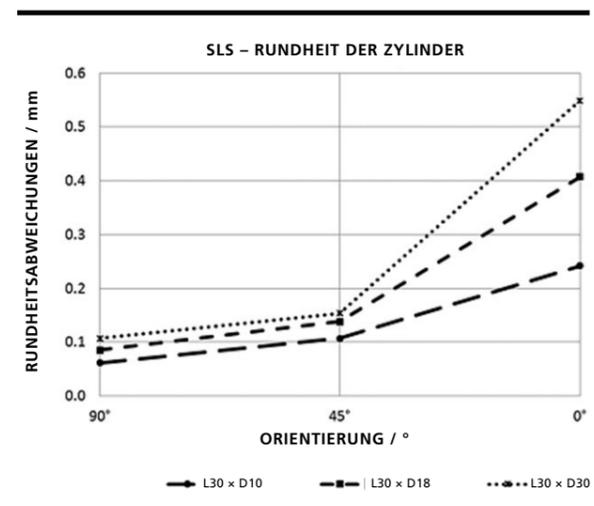
Untersuchung der Ebenheitsgenauigkeit werden Zylinder und Bohrungen zur Ermittlung von Rundheit, Zylindrizität und Koaxialität gestaltet. Weiterhin werden z. B. Plattenkombinationen definiert, um die erreichbare Rechteckigkeit oder Parallelität zu messen. Die Abbildung 2.12 zeigt eine Auswahl von Prüfkörpern in verschiedenen Orientierungen. Bei den dargestellten Prüfkörpern handelt es sich um sogenannte Einzelprüfkörper, die eine genaue Untersuchung aller definierten Einflussfaktoren zulassen. Neben den Einzelprüfkörpern wurde im Rahmen des Projektes ebenfalls ein universeller Prüfkörper entwickelt (vgl. Abbildung 2.13). Dieser ermöglicht die Untersuchung von Geometrieelementen mit einer eingeschränkten Variation von Einflussfaktoren, um Anhaltswerte zu geometrischen Toleranzen zu ermitteln. Verschiedene Fertigungsanlagen, sowie variierende Prozessparameter können anhand des universellen Prüfkörpers schnell und wirtschaftlich evaluiert werden.

Die folgenden Schritte in der Methodenentwicklung und die experimentellen Untersuchungen werden exemplarisch für den Einzelprüfkörper Nr. 2 „Hohlzylinder“ dargestellt (vgl. Abbildung 2.12). Neben der Orientierung des Hohlzylinders werden Zylinderlänge und -durchmesser variiert. In Tabelle 2.14 sind Zylinderlängen, Durchmesser und Orientierungen aufgeführt, die im Weiteren näher betrachtet werden.

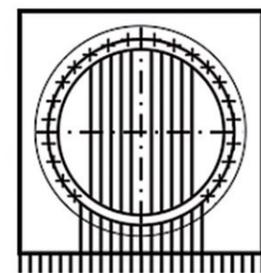
MESSTMETHODE

In der Messtechnik ist die Planung der Messmethode wichtig, um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen. So wird für jeden Prüfkörper eine aussagekräftige Extraktions- und Assoziationsstrategie ausgewählt und entwickelt. Im Fall des Hohlzylinders wurden verschiedene Extraktionsstrategien analysiert und bewertet. Im Hinblick auf die Zielgrößen und die hohe, variierende Oberflächenrauheit bei additiv gefertigten Bauteilen wurden Rundheitsprofile in drei verschiedenen Höhen entlang der Zylinderlänge definiert. In einem nächsten Schritt wurde die Anzahl der Messpunkte für

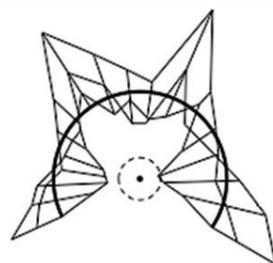
jeden Zyklus oder jedes Rundheitsprofil festgelegt. Die empfohlene Mindestanzahl an Messpunkten für Rundheitsprofile beträgt neun. Aufgrund der erhöhten Oberflächenrauheit bei additiv gefertigten Bauteilen wurde eine deutlich höhere Anzahl an Messpunkten vorgesehen, um die auftretenden Abweichungen aufnehmen zu können. So enthielt beispielsweise ein einzelnes Rundheitsprofil mit einem Durchmesser von 30 mm 50 Messpunkte. Daraus folgt, dass ein kompletter Einzelprüfkörper mit einem Außendurchmesser von 30 mm auf drei Rundheitsprofilen mit insgesamt 150 Punkten taktil vermessen wurde. Die Notwendigkeit dieser hohen Anzahl an Punkten wird durch die Ergebnisse der optischen Messung in Abschnitt „Experimentelle Untersuchung“ unterstrichen. Aufgrund des prozessspezifischen Supportmaterials im LPBF musste die Antaststrategie für Hohlzylinder in 0°-Orientierung lokal angepasst werden. Somit werden Oberflächen, die mit Supportmaterial in Kontakt stehen, bei der Messung ausgelassen. Mit dem Koordinatenmessgerät Nikon Altera 8.7.6 wurden die geometrischen Abweichungen erfasst. Das taktile Messsystem hat eine volumetrische Genauigkeit von $1,8 \mu\text{m} + N / 400$. Darüber hinaus dient der optische Scanner Nikon LC15Dx zur detaillierten Extraktion. Die Ergebnisse der optischen Messungen dienen dazu, die auftretenden Abweichungen hervorzuheben und deren Ursachen genauer zu identifizieren.



2.15 RUNDHEITSABWEICHUNGEN IN ABHÄNGIGKEIT DES NENNDURCHMESSERS UND DER ORIENTIERUNG BEIM SLS



HOHLZYLINDER MIT SOLIDEM SUPPORT



TAKTILE MESSUNG DER ABWEICHUNGEN



OPTISCHER SCAN DER ABWEICHUNGEN

2.16 EINFLUSS VON SOLIDEM SUPPORT AUF DIE AUFTRETENDEN ABWEICHUNGEN: MESSPUNKTANORDNUNG SOWIE QUALITATIVE DARSTELLUNG DER TAKTILEN UND OPTISCHEN MESSERGEBNISSE BEIM HOHLZYLINDER IN 0°-ORIENTIERUNG (LPBF)

NENNMASSE	VERFAHREN	ISO TOLERANZKLASSE EINZELPRÜFKÖRPER	ISO TOLERANZKLASSE UNIVERSELLER PRÜFKÖRPER
6 – 10 mm	SLS	IT14	IT11
	FDM	IT11	IT11
	LPBF	IT14	IT13
10 – 18 mm	SLS	IT15	IT11
	FDM	IT12	IT12
	LPBF	IT15	IT12
18 – 30 mm	SLS	IT15	IT11
	FDM	IT12	IT11
	LPBF	IT15	IT12

2.17 ISO-TOLERANZKLASSEN FÜR DIE BETRACHTEN VERFAHREN

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

Die folgenden Ergebnisse konzentrieren sich auf die experimentelle Untersuchung von Fused Deposition Modeling (FDM), Selektive Lasersintern (SLS) und LPBF. Das Diagramm in Abbildung 2.15 zeigt die Mittelwerte der Rundheitsabweichungen beim SLS in Abhängigkeit von der gewählten Orientierung und dem Nennmaß des Hohlzylinders. Unterschiedliche Nenndurchmesser des Zylinders sind durch drei Linientypen gekennzeichnet. Die SLS-Hohlzylinder zeigen bei allen Nennmaßen den Trend zu größeren durchschnittlichen Abweichungen bei einem abnehmendem Orientierungswinkel. Dies bedeutet, dass die kleinsten Rundheitsabweichungen bei einer Orientierung von 90° erzielt werden können. Mit zunehmendem Zylinderdurchmesser steigt der Mittelwert der Rundheitsabweichungen. Diese Beobachtung gewinnt angesichts der Orientierung von 0° an Bedeutung, da aufgrund der schichtweisen Herstellung größere geometrische Abweichungen bei größeren Durchmessern zu erwarten sind.

Das LPBF zeigt die gleichen Trends wie das SLS-Verfahren. Der Einfluss des soliden Supportmaterials ist jedoch besonders zu betrachten. Im Gegensatz zum SLS wird beim LPBF solides Supportmaterial verwendet, um die Wärme aus der aktuellen Fertigungsschicht abzuleiten und Eigenspannungen bzw. Verzug von Bauteilen zu reduzieren. Daher weisen Bereiche eines Bauteils, die mit solidem Supportmaterial in Kontakt stehen, geringere Abweichungen auf. Diese Tatsache kann sowohl durch den taktilen als auch durch den optisch gemessenen Hohlzylinder in 0°-Orientierung hervorgehoben werden (siehe Abbildung 2.16).

Insbesondere die optische Messung unterstreicht die Notwendigkeit und Wichtigkeit einer hohen Anzahl von taktilen Messpunkten und den Einfluss von solidem Supportmaterial sowie die geringeren Abweichungen in diesen Bereichen.

ERREICHBARE TOLERANZWerte FÜR ADDITIVE FERTIGUNGSVERFAHREN

Aus den Versuchsergebnissen werden Toleranzwerte nach DIN EN ISO 286-1 abgeleitet. Dabei werden nicht wie im Diagramm dargestellt, die Mittelwerte, sondern die maximalen Abweichungen nach einem Ausreißertest verwendet, um geringste Fertigungsgenauigkeit bzw. höchsten Toleranzwerte aufzuzeigen. Für die erreichbare Rundheitsgenauigkeit zeigt die 0°-Orientierung das

Maximum der Abweichungen und damit die Einschränkung der Fertigungsgenauigkeit. Abbildung 2.17 zeigt exemplarisch die erreichten ISO-Toleranzklassen.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der vorliegende Beitrag liefert eine systematische Untersuchung der geometrischen Genauigkeit bei additiven Fertigungsverfahren. Basierend auf einer bestehenden Methode zur Analyse von Maßabweichungen zeigt dieser Beitrag eine Erweiterung zur Untersuchung von Form- und Lageabweichungen. Auf Basis relevanter Einflussfaktoren wurden notwendige Prüfkörper entwickelt. Die resultierende Methode wurde in experimentellen Untersuchungen getestet. Die definierten Einflussfaktoren und deren Variationen konnten als geeignet eingestuft werden. Neben taktilen Messmethoden mit einer hoher Punktzahl bieten optische Messmethoden einen klaren Vorteil, um die lokalen geometrischen Abweichungen und deren Ursachen im Detail untersuchen zu können. Insbesondere durch lokalen Verzug und unterschiedliche Oberflächenrauheit an einem Prüfkörper, muss eine ausreichende Anzahl von Messpunkten vorgesehen werden.

Die Ergebnisse veranschaulichen beispielhaft einen quantitativen Einfluss der Orientierung und des gewählten Nennmaßes auf die Rundheit additiv hergestellter Bauteile. Die abgeleiteten Toleranzwerte für die Rundheit des zylindrischen Probekörpers wurden für die Verfahren in IT-Klassen zwischen 11 und 15 eingeteilt.



PROJEKT-ANSPRECHPARTNER
UNIVERSITÄT PADERBORN,
KONSTRUKTIONS- UND ANTRIEBSTECHNIK
TOBIAS LIENEKE
WISSENSCHAFTLICHER MITARBEITER
TOBIAS.LIENEKE@UPB.DE



PROJEKT-ANSPRECHPARTNER
UNIVERSITÄT PADERBORN,
KONSTRUKTIONS- UND ANTRIEBSTECHNIK
THOMAS KÜNNEKE
WISSENSCHAFTLICHER MITARBEITER
THOMAS.KUENNEKE@UPB.DE

AUTOREN: MARTIN SCHÄFER, TOBIAS LIENEKE & THOMAS KÜNNEKE

FALLSTUDIE SIEMENS: AUFBAU AUF GUSS-HALBZEUGEN MITTELS LPBF

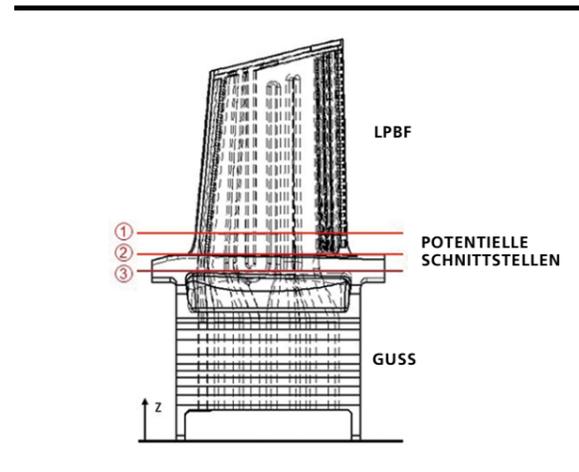
MOTIVATION UND ZIELE

Innovationen in Produktionsprozessen und Fertigungstechnologien stellen einen bedeutenden Faktor hinsichtlich der Wettbewerbsfähigkeit dar. Grundlegende Weiterentwicklungen verschiedener Fertigungstechnologien können durch deren Kombination herbeigeführt werden. Eine solche Kombination wird als hybride Prozesskette bezeichnet. Einerseits sollen die Nachteile der einzelnen Verfahren reduziert bzw. ausgeglichen werden. Andererseits sollen ihre Vorteile kombiniert werden.

Additive Verfahren zeichnen sich besonders durch ihre hohe Gestaltungsfreiheit und die Wirtschaftlichkeit kleiner Stückzahlen aus. Die klassische Fertigung ist hingegen bei einfachen und massiven Bauteilgeometrien, erzielbaren Genauigkeiten sowie hohen Stückzahlen im Vorteil. Aus wirtschaftlichen Gründen sollte das additiv aufzubauende Volumen gegenüber klassische gefertigten Bauteilbereichen möglichst gering gehalten werden. Komplexe und filigrane Strukturen hingegen sind mit additiven Verfahren wirtschaftlicher herzustellen. Im Fall des Demonstrators Turbinenschaufel der Siemens AG zeigt sich ein massiver und wenig komplexer Schaufelfuß und ein mit komplexen Kühlkanälen versehenes Schaufelblatt (vgl. Abbildung 2.2).

PROBLEMLÖSUNG

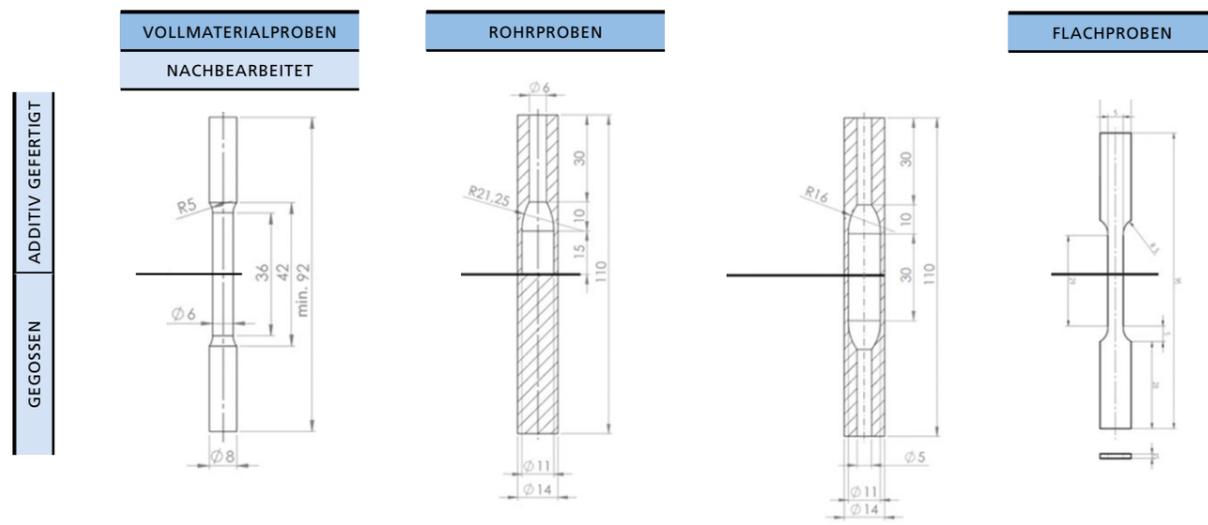
Neben einer Komplexitätsbestimmung zur Auswahl der jeweiligen Bauteilbereiche, wurden aufgrund der hohen dynamischen Belastungen unterschiedliche Schnittstellen aus geometrischer und mechanischer Sicht an der Turbinenschaufel diskutiert (vgl. Abbildung 2.18). Die Schnittstelle 1 zeigt einen Schnittverlauf ausschließlich durch dünnwandige Strukturen. Schnittstelle 2



2.18 TURBINENSCHAUFEL MIT POTENTIELLEN SCHNITTSTELLEN ZWISCHEN GUSS UND LPBF

wurde in einem Übergangsbereich zwischen dünnwandiger Struktur und massivem Bereich festgelegt. Schnittverlauf 3 beschreibt einen Verlauf, in dem im Vollmaterial geschnitten wird.

Zur Ermittlung der mechanischen Festigkeit von hybriden Bauteilen wurden in Kooperation mit der Siemens AG Prüfkörper entwickelt (vgl. Abbildung 2.19). Die Prüfkörper berücksichtigen die geometrischen Gegebenheiten der potentiellen Schnittstellen. Diese wurden sowohl rein additiv als auch hybrid aus Inconel 718 gefertigt, um einen Vergleich der mechanischen Kennwerte zu ermöglichen. Der Probenumfang wurde neben Rundproben um Flachproben und Rohrproben erweitert, welche unter 90° und teils unter 45° im LPBF-Bauraum positioniert und aufgebaut wurden.



2.19 PRÜFKÖRPERGEOMETRIE FÜR DIE EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG VON STATISCHEN KENNWERTEN (vgl. DIN 50125)

LASER-STRAHLSCHMELZEN (LPBF) INCONEL 718	ZUGFESTIGKEIT [MPa]	BRUCHDEHNUNG [%]
Schichtdicke 30 µm	1070 – 1220	18 – 20
Schichtdicke 60 µm	1085 – 1145	8 – 16
GIESSEN		
Guss	850 – 950	5 – 10
HYBRIDE PROZESSKETTE (GIESSEN UND LPBF)		
Guss_LPBF	795 – 990	3 – 8

2.20 EINFLUSS DER FERTIGUNGSTECHNOLOGIEN AUF AUSGEWÄHLTE PRODUKTEIGENSCHAFTEN

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG

Zu Beginn wurden unterschiedliche Prozessparameteranalysen auf die Zugfestigkeit und Bruchdehnung im Bereich LPBF durchgeführt, um eine geeignete LPBF-Parametereinstellung für die hybride Prozesskette zu identifizieren. Neben dem LPBF-Verfahren wurden reine Gussprüfkörper als Referenz hergestellt und getestet. Darauf folgend konzentrierte sich die experimentelle Untersuchung der hybriden Prüfkörper auf die Untersuchung der statischen Festigkeit und Bruchdehnung. Dazu wurden die Guss-Halbzeuge nach ihrer Herstellung zunächst lösungsgeglüht, um die Schweißbarkeit für den folgenden LPBF-Prozess zu erhöhen.

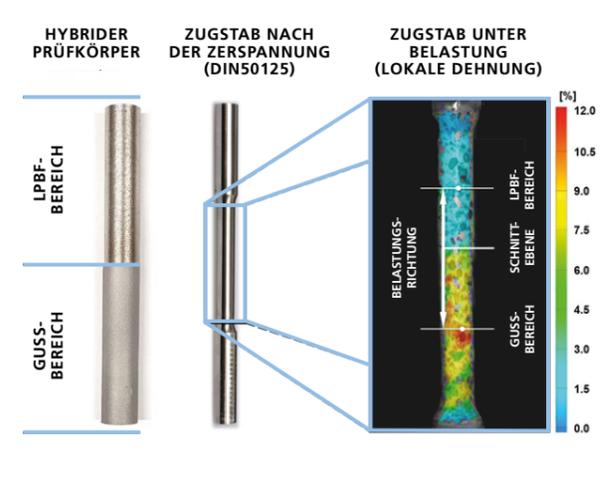
Nach dem LPBF-Prozess wurden die Prüfkörper lösungsgeglüht und ausscheidungsgehärtet. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass der Bereich der Verbindungsstelle und insbesondere die Wärmeeinflusszone nicht bei der Zugprüfung versagen. Das Versagen der Proben wird vornehmlich innerhalb der Guss-Halbzeuge festgestellt. Dabei zeigten optische Messverfahren während der Zugprüfung, dass die gegossenen Prüfkörperbereiche deutlich höhere lokale Dehnungen aufwiesen.

Die ermittelten numerischen Werte zeigen, dass Prüfkörper aus einer reinen LPBF-Fertigung nach einer Wärmebehandlung deutlich

höhere Festigkeiten und Bruchdehnungen erzielen als gegossene Prüfkörper. Dabei ist der Einfluss der gewählten Prozessparameter, z.B. Schichtdicke, deutlich zu erkennen (vgl. Tabelle 2.20). Die hybriden Prüfkörper zeigen Zugfestigkeiten und Bruchdehnungen im Bereich der klassischen Gussverfahren, was mit der Aussage über die Versagensstelle im Guss einhergeht.

ZUSAMMENFASSUNG

Diese Untersuchung von hybriden Prozessketten verdeutlicht, dass die technische und wirtschaftliche Umsetzung im Projekt aufgezeigt werden konnte. Die ermittelten mechanischen Kennwerte zeigen, dass die Verbindungsstelle bei statischen Lasten nicht zum Versagen führt. Die Kennwerte der hybriden Proben liegen im Bereich der Kennwerte von klassischen Gussverfahren. Trotz einer nachträglichen Wärmebehandlung konnten keine homogenen Eigenschaften an hybriden Prüfkörpern erreicht werden, was insbesondere durch die lokalen Dehnungen im Zugversuch zu erkennen ist. Neben dem hybriden Aufbau von Prüfkörpergeometrien fand der Aufbau von Bauteilbereichen an der Turbinenschaufel statt, um die technische Machbarkeit zu demonstrieren. Weiterführend werden dynamische Untersuchungen durchgeführt, um die Belastungen im Anwendungsfall abzudecken.



2.21 DARSTELLUNG DES HYBRIDEN PRÜFKÖRPERS, DES ZUGSTABS NACH DER ZERSpanUNG SOWIE LOCALE DEHNUNGEN DES HYBRIDEN ZUGSTABS WÄHREND DER ZUGPRÜFUNG IM GUSS- UND LPBF-BEREICH

PROJEKT-ANSPRECHPARTNER BEI SIEMENS
MARTIN SCHÄFER
SENIOR KEY EXPERT
MARTIN.SCHAEFER@SIEMENS.COM

PROJEKT-ANSPRECHPARTNER UNIVERSITÄT PADERBORN, KONSTRUKTIONS- UND ANTRIEBSTECHNIK
TOBIAS LIENEKE
WISSENSCHAFTLICHER MITARBEITER
TOBIAS.LIENEKE@UPB.DE

PROJEKT-ANSPRECHPARTNER UNIVERSITÄT PADERBORN, KONSTRUKTIONS- UND ANTRIEBSTECHNIK
THOMAS KÜNNEKE
WISSENSCHAFTLICHER MITARBEITER
THOMAS.KUENNEKE@UPB.DE

AUTOR: RAMI FAROUN

FALLSTUDIE GKN: KOMBINATION AUS ADDITIVER UND PULVERMETALLURGISCHER FERTIGUNG ANHAND EINES TOPOLOGIE- OPTIMIERTEN ZAHNRADES

MOTIVATION UND ZIELE

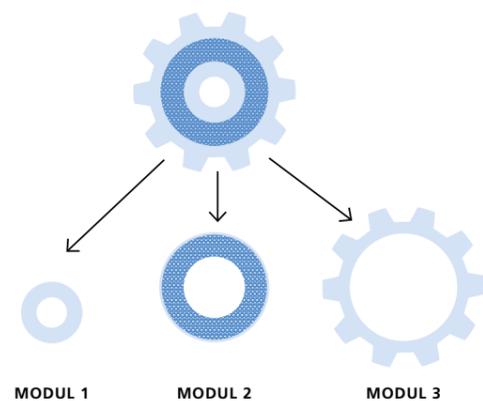
Mit der additiven Fertigung können neben individuellen Anfertigungen auch für größere Stückzahlen funktionelle Strukturen hergestellt werden, die mit herkömmlichen Technologien nicht erzeugt werden können. Für eine wirtschaftlichere Ausnutzung der Maschinen und das Kombinieren von Vorteilen additiver und konventionellen Fertigungsverfahren wurde im Rahmen von KitkAdd der Ansatz der hybriden Fertigung verfolgt. Bei dem Ansatz der hybriden Fertigung bei GKN wird ein mit LPBF hergestelltes Bauteil in eine Pulverpresse eingelegt und in den Pressprozess integriert (vgl. Abbildung 2.23). Anschließend wird das hybride Bauteil gesintert und entsprechend der Bauteilanforderung nachbearbeitet. Der Prozess, zwei Bauteile durch Sintern zu fügen wird auch Sinterfügen genannt.

Als Demonstrator wurde ein Zahnrad gewählt, welches durch die hybride Bauweise auf seine gewichts- und NVH- (noise, vibration,

harshness) Eigenschaften optimiert werden soll. Der Demonstrator wurde von einem aktuellen Produkt vom GKN Portfolio abgeleitet und für die Entwicklung des Prozesses in dem Projekt herunterskaliert. Mit dem präsentierten Zahnrad soll produktseitig ein Vorteil generiert werden, der nur durch eine additive Fertigung möglich ist. Die veränderte und komplexe Geometrie vom Zahnradinnenkörper erlauben zur Fertigung keine herkömmlichen Verfahren, liefert jedoch einzigartige Vorteile in der Funktion vor allem in zukunftsorientierten Anwendungen wie elektrischen Antrieben.

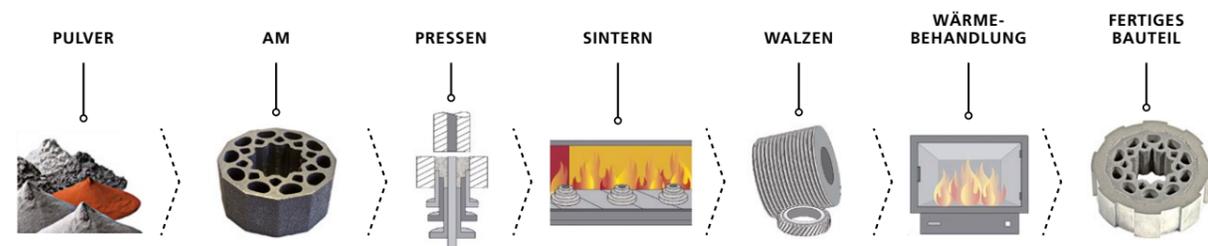
PROBLEMLÖSUNG

Für die hybride Fertigung wurde der Demonstrator in drei Module unterteilt (siehe Abbildung 2.22). Um einen größtmöglichen Effekt



MODULANZAHL	3
WERKSTOFF	20MnCr5 (Einsatzstahl)
AUSSENDURCHMESSER	55 mm
BOHRUNGSDURCHMESSER	18 mm
AUSSENDURCHMESSER INSERT	45 mm
GESAMTMASSE (NACH TOPOLOGIEOPTIMIERUNG)	223 g

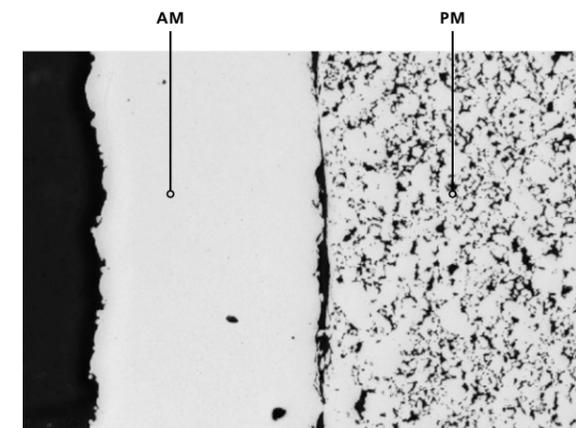
2.22 UNTERTEILUNG DEMONSTRATOR IN DREI MODULE



2.23 PROZESSKETTE HYBRIDE AM-FERTIGUNG BEI GKN

auf die NVH-Performance sowie auf den Designraum für eine Strukturoptimierung zu erzielen, werden die Module 1 und 2 (im weiteren Insert genannt) mit LPBF und Modul 3 durch Pressen gefertigt. Das Verbundprinzip zwischen den Modulen basiert zum einen auf einen Stoffschluss, welcher sich durch die Modifikation des Pressprozesses erzielen lässt und zum anderen auf einen Formschluss, der durch die Konstruktion des Inserts maßgeblich beeinflussbar ist.

Für die hybride Fertigung durch Einlegen eines AM-Bauteils in die Presse und anschließendem Verpressen mit einem PM-Bauteil müssen geometrische Anpassungen an dem Insert unternommen werden. Durch die Topologieoptimierung und einer anschließenden Geometrieanpassung soll der Formschluss während des Pressens gewährleistet werden. Die Topologieoptimierung wurde hinsichtlich der auftretenden Presskräfte auf das Insert optimiert und dabei wurden ca. 50 % des Materials eingespart. Durch die Struktur ist es möglich, den Springback-Effekt zu reduzieren und mögliche Risse im Verbund zu vermeiden. Der Springback beschreibt die Verformung des Bauteils durch das Entformen über die Werkzeugstempel. Bei der ersten Machbarkeitsstudie wurde gezeigt, dass grundsätzlich die Idee von einem Verbund zwischen einem additiv gefertigten und pulvermetallurgisch hergestellten Teil als hybrides Fertigungsverfahren realisierbar ist. Die Herausforderung im Weiteren liegt in der Vermeidung eines Spaltes im Verbund (vgl. Abbildung 2.24). Ein Ziel des Projektes ist die Herstellung eines form- und stoffschlüssigen Verbundes, der die Anforderung an die Drehmomente erfüllt.



2.24 MACHBARKEITSSTUDIE

Als Lösungsansatz den Verbund zwischen dem additiv gefertigten Insert und dem verpressten Pulver zu optimieren, sollen sowohl geometrische Anpassungen an das AM-Bauteil als auch prozesstechnische Optimierungen durchgeführt werden. Als Alternative zum Sinterfügen wurde das Sinterlöten untersucht, bei dem ein Sinterlot als zusätzliche Verbindung zwischen den beiden Bauteilen fungieren soll. Als qualitative Bewertung wurden Schlifffbilder angefertigt um die Verbundzone zu analysieren. Als quantitative Bewertung wurde ein Versuchsstand umgebaut, womit das maximale Drehmoment an den hybriden Bauteilen gemessen werden soll. Hierbei wird das Bauteil mit maximal 1000 Nm belastet und der Verfahrweg des Kolbens aufgenommen. Die maximale Belastung ist auf den Teststand zurückzuführen, welcher auf 1000 Nm begrenzt ist. Jedoch wird dabei das geforderte Drehmoment abgedeckt.

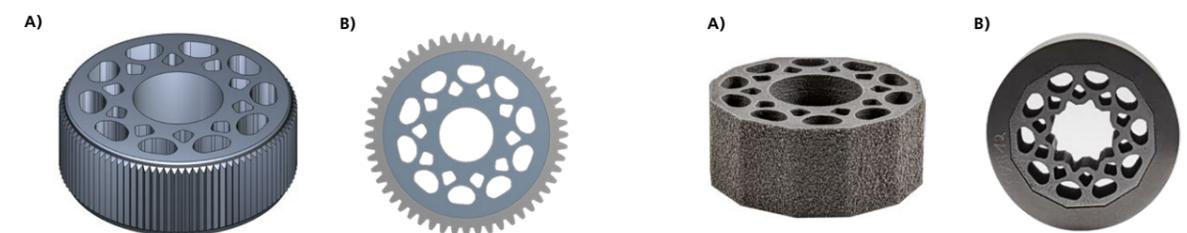
Bezüglich der NVH-Optimierung sollen mehrere Strukturen definiert werden, die im Anschluss additiv gefertigt und mittels Eigenfrequenzmessung auf die Dämpfungseigenschaften untersucht werden.

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG

GEOMETRIEANPASSUNG AM DEMONSTRATOR

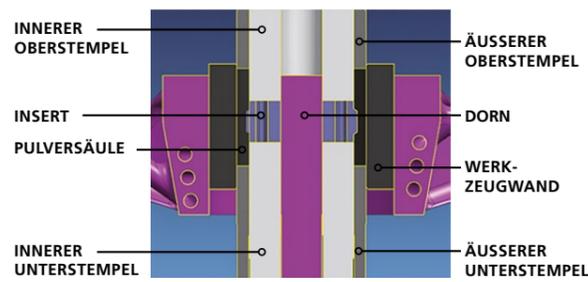
Um den Verbund durch weitere Geometrieanpassungen zu verbessern, wurde die Mantelfläche des Inserts mit einer Profilierung versehen. Dies bewirkt eine größere Oberfläche des Verbundes für eine größere Angriffsfläche beim Sintern und gleichzeitig eine Verkantung entgegen der Drehrichtung beider Module. Mit diesen Maßnahmen soll ein höheres Drehmoment erzielt werden. In Abbildung 2.25 ist beispielhaft die Profilierung mit einer Kerbflankenform zu sehen.

Neben dem Sinterfügen als Lösungsansatz wurde auch das Sinterlöten betrachtet. Hierbei werden zwei Bauteile durch ein Sinterlot miteinander gefügt. In diesem Projekt wurde das Sinterlot genau in der Verbundfläche aufgetragen, um einen möglichen Spalt durch dieses Lot zu füllen und als Bindeglied zu fungieren. Während des Sintervorgangs geht das Kupferlot aufgrund der niedrigeren Schmelztemperatur in die Flüssigphase über und verbindet sich mit den beiden Modulen. Die Herausforderung in diesem Falle ist, dass das Sinterlot vor dem Einlegen des Inserts in die Presse auf die Mantelfläche aufgetragen werden und den Pressablauf überstehen muss. Als Sinterlot kann entweder eine Paste oder eine Folie genutzt werden. Beispielhaft ist in Abbildung 2.26 ein Insert mit Lötpaste abgebildet.



2.25 PROFILIERUNG DES INSERTS ZUR VERBESSERUNG DES FORMSCHLUSSES A) INSERT, B) HYBRIDBAUTEIL MIT PROFILIERTEM INSERT

2.26 A) INSERT MIT KUPFERFOLIE UMWICKELT, B) GESINTERTES HYBRIDBAUTEIL



2.27 WERKZEUGAUFBAU VOM OPTIMIERTEN PROZESS

PROZESSTECHNISCHE OPTIMIERUNG

Für die Optimierung des Verbunds ist prozessseitig der Verfahrweg der Ober- und Unterstempel sowie die Positionierung des Inserts in dem Werkzeug hauptsächlich ausschlaggebend. Um einen ausreichenden Verbund zwischen den Modulen herzustellen, muss das Werkzeug so modifiziert werden, dass ein Verdichten in den Zwischenräumen des Profils durch genau abgestimmte Stempelkonstruktion und -verfahrwege ermöglicht wird. Mit dem modifizierten Werkzeug und angepasster Profilierung des Inserts soll eine vollständige Verdichtung in den Zwischenräumen erzielt werden.

In Abbildung 2.27 ist die Umsetzung vom optimierten Werkzeugaufbau dargestellt. Ein Effekt, der beim Pressen auftritt, ist der sogenannte Springback: beim Auseinanderfahren der Stempel um das Bauteil freizulegen, verformt sich das Bauteil durch die nachlassende Kraft auf das Bauteil. Bei der hybriden Fertigung ist die zusätzliche Herausforderung, dass das massive Insert eine andere Verformung durchläuft wie das verpresste Pulver und dadurch auch ein Spalt entstehen kann. Dieser Effekt wurde durch das Einstellen bestimmter Parameter an der Presse minimiert.

Das Sintern wurde am GKN-Standort in Krebsöge durchgeführt. Als Sinterprogramme wurde ein Standardprogramm gewählt. So wurde möglichst nah an den standardmäßig verwendeten Temperaturen getestet um die Synergien mit der konventionellen Fertigung zu nutzen.

ERGEBNISSE

ANALYSE DES VERBUNDS

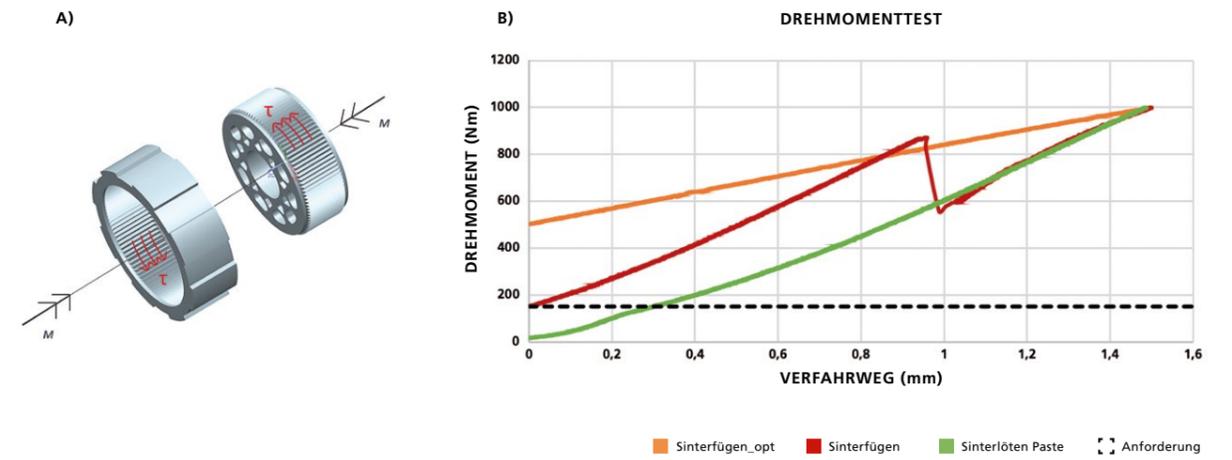
Für die Validierung des Verbundes an den gefertigten Bauteilen wurde sowohl die mechanische Belastbarkeit des Verbundes, als auch die Dämpfungswirkung der LPBF-Struktur geprüft. Im Vergleich der Fügeverfahren (siehe Abbildung 2.28) wird ersichtlich, dass der Verbund im optimierten Pressprozess im Vergleich zu dem nicht-optimierten Pressablauf deutlich verbessert wurde. Es sind mehr Sinterbrücken zwischen beiden Bauteilen vorhanden und der Verbund ist homogen. Ersichtlich ist auch, dass das Sinterlöten mit Paste oder Folie als Verbindungsglied eine Alternative zum reinen Sinterfügen darstellt. Die Optimierung des Verbundes resultiert aus der optimierten Konstruktion des Inserts und dem optimierten Pressablauf.

In einem Versuch wird über einen eigens entwickelten Teststand die Festigkeit des Verbunds gemessen. Nach dem Prinzip eines Drehmomenttests (Abbildung 2.29) wird das Zahnrad in eine Vorrichtung eingebaut worauf anschließend ein Drehmoment übertragen wird. Während dem Versuchsdurchlauf wird das aufgebraute Drehmoment linear bis zum Bruch erhöht.

In dem Test wurden drei Varianten geprüft: ein sintergefügtes Bauteil mit dem optimierten Pressablauf, ein sintergefügtes Bauteil ohne optimierten Pressablauf und ein sintergelötetes Bauteil mit Paste. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die Variante mit dem nicht optimierten Pressablauf einen Einbruch in dem übertragenen Drehmoment erfährt. Grund hierfür ist wahrscheinlich, dass die Sinterbrücken zwischen dem LPBF- und dem PM-Bauteil

	FÜGESTRATEGIE			
	SINTERFÜGEN	SINTERFÜGEN OPTIMIERT	SINTERLÖTEN	
FÜGEMATERIAL	Keins	Keins	Kupferfolie	Paste
DARSTELLUNG				
VERBUND				

2.28 VERGLEICH DER FÜGEVERFAHREN UND SCHLIFFBILDER

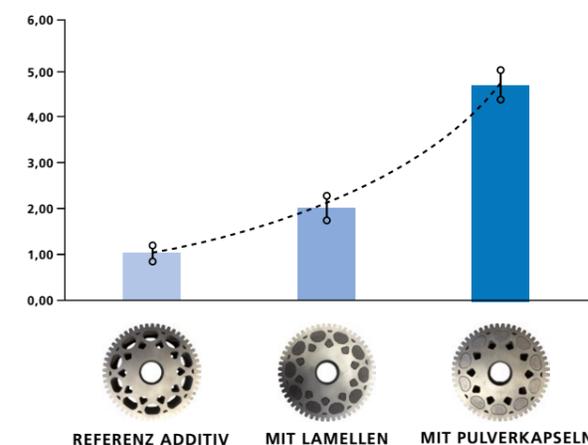


2.29 DREHMOMENTTEST: A) WIRKPRINZIP, B) ERGEBNISSE IM VERGLEICH ZUR ANFORDERUNG

gebrochen sind und dadurch nur noch der Formschluss das Bauteil zusammenhält. Jedoch haben alle drei Varianten das angeforderte Nenndrehmoment von 150Nm bei Weitem übertroffen und das maximale Drehmoment von 1000 Nm (durch die Vorrichtung begrenzt) überstanden.

VALIDIERUNG DER NVH-PERFORMANCE

Der Mehrwert der LPBF-spezifischen Struktur wurde mittels Impulshammer-Methode auf seine NVH-Performance geprüft. Das Prinzip der Prüfung ist die Ermittlung des Dämpfungsgradienten durch Einbringen eines Impulses mittels eines Hammers und Aufnehmen der Eigenfrequenzen durch einen angebrachten Sensor. Über die gemessenen Eigenmoden wird die Dämpfung ermittelt. Geprüft wurden ein Referenzbauteil, ein mit Lamellen versehenes und ein mit Pulverkapseln gefülltes Zahnrad. Die Lamellen sollen als Störstellen fungieren, welche den zurücklegenden Weg der Schallwellen erhöht. Die Pulverkapseln wurden aus einer massiven Hülle und eingeschlossenem Pulver gedruckt und anschließend in die Aussparungen des Zahnrades eingesetzt.



2.30 DÄMPFUNG VERSCHIEDENER STRUKTUREN

Alle Bauteile wurden rein additiv gefertigt, um den Einfluss eines inhomogenen Verbunds auf die Dämpfung zu vermeiden. Der Sensor wurde mittig in Nähe der Bohrung angebracht und es wurde an zwei Positionen, an der Zahnflanke und am Zahnkranz, mit dem Impulshammer angeregt. Jede Messung wurde fünfmal wiederholt um potenzielle Streuungen zu identifizieren. In den Ergebnissen ist zu erkennen, dass das Referenzbauteil ohne geometrische Besonderheiten am schlechtesten abschnitt. Das Bauteil mit den Lamellen hat einen um den Faktor zwei erhöhten durchschnittlichen Dämpfungswert. Der Ansatz der Störstellen konnte somit bestätigt werden. Zuletzt wurde das Bauteil mit den eingefügten Pulverkapseln getestet. Der Dämpfungsgrad ist bei dieser Variante am größten. Hier tritt der Effekt der Störstellen durch viele kleine Pulverpartikel und Leerräume und die Umlenkung der Schallwellen am stärksten auf.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des KitkAdd Projektes konnte gezeigt werden, dass ein hybrides Bauteil aus LPBF und PM erfolgreich hergestellt werden konnte, welches den Anforderungen entspricht und wesentliche Vorteile gegenüber rein konventionell hergestellten Bauteilen aufzeigt. Es wurden mehrere Lösungswege zu Erreichung eines festen Verbundes erarbeitet und validiert. Eine AM-spezifische Struktur ermöglicht es darüber hinaus, signifikante Vorteile in der Bauteildämpfung zu erzielen. Durch eine Lamellenstruktur oder Pulverkapseln kann die Dämpfung um bis zu Faktor fünf erhöht werden. An diesem Ergebnis wird nochmals verdeutlicht, wie AM-spezifische Strukturen zu verbesserter Performance im NVH-Bereich beitragen können. Ausblickend sind weitere Optimierungen des Inserts hinsichtlich Kosten und Dämpfung sowie die Integration in den Pressprozess geplant.



**PROJEKT-ANSPRECHPARTNER
BEI GKN SINTER METALS**
RAMI FAROUN
ENTWICKLUNGSINGENIEUR ADDITIVE
MANUFACTURING
RAMI.FAROUN@GKNPM.COM

FALLSTUDIEN JOHN DEERE: FLUIDFÖRDERUNG UND WÄRMEÜBERTRAGUNG

FLUIDFÖRDERSTUDIE MITTELS ADDITIV GEFERTIGTER GEOMETRIEN ANHAND EINES DEMONSTRATORBAUTEILS

MOTIVATION UND ZIELE

Die Gestaltungsfreiheit von LPBF bietet im Bereich der Tribologie Vorteile gegenüber klassischen Fertigungsverfahren. Hierzu sollen flüssigkeitsfördernde Strukturen in ein Sonnenrad eines Planetenradgetriebes eingebracht werden. Unter der Beibehaltung der Schmierstoffmenge und -eigenschaften sowie geometrischer Randbedingungen, soll die Schmierstoffversorgung im Zahneingriff verbessert und Planschverluste reduziert werden. Weiterhin soll neben der wirtschaftlichen Untersuchung der hybriden Prozesskette eine Aussage getroffen werden, ob der technische Einsatz dieses Wirkprinzips sinnvoll ist.

PROBLEMLÖSUNG

Zum strukturierten Entwickeln von Lösungsansätzen wurde die im Projekt angepasste Konstruktionsmethodik durchlaufen. Als Hauptfunktion der Förderstruktur wurde „Öl durch Rotation der Welle nach außen fördern“ definiert.

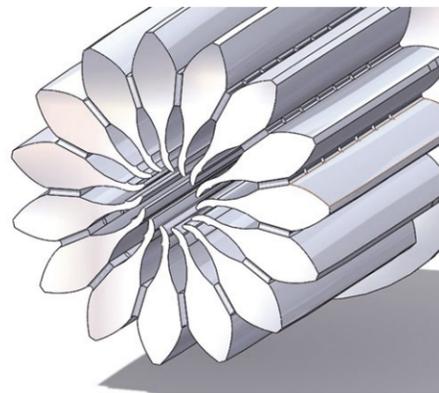
Bei den entwickelten Wirkprinzipien zeichneten sich zwei Überkategorien ab; „innenliegende“ und „außenliegende“ Förderstrukturen. Innenliegende Förderstrukturen können beispielsweise Kavitäten mit Durchgangskanälen, welche nach außen führen oder integrierte Archimedesschnecken aufweisen, sein. Beispielhafte Lösung für eine außenliegende Förderstruktur sind auf der Welle aufgesetzte Schaufeln, die in den Ölsumpf eingreifen und das Fluid nach oben fördern. Das Lösungsprinzip „Kavitäten im Welleninneren mit Flüssigkeitsaustrittskanälen an den Zahnfüßen“ stellte das erfolgversprechendste Lösungsprinzip dar. Bei dieser Lösung konnte eine Vielzahl geometrischer Einflussfaktoren auf das Förderverhalten der durchströmenden Flüssigkeit identifiziert werden. Besonders die Form und Breite der Kavitäten, sowie der Durchmesser und die Anzahl der Austrittskanäle wirken sich auf die Förderwirkung aus. Um das Sammeln

der Flüssigkeit in der Kavität beim Eintauchvorgang und das Auswerfen der Flüssigkeit beim Auftauchen zu verbessern, wurde eine tropfenförmige Kavitätsgeometrie verwendet, welche in Austrittskanälen mündet. Des Weiteren fand eine geometrische Anpassung der Kavitätseintrittsoffnungen statt. Eingreifschaukeln wurden eingebracht, um die Flüssigkeitsförderung zu verbessern (vgl. Abbildung 2.31). Für die Evaluierung der Geometrie wurde ein Prüfstand entwickelt, welcher die Betriebsbedingungen der Sonnenradwelle möglichst realitätsnah widerspiegelt. Um die Wirksamkeit der Förderstrukturen isoliert betrachten zu können, wurden die Zähne von der Wellenseite zunächst entfernt.

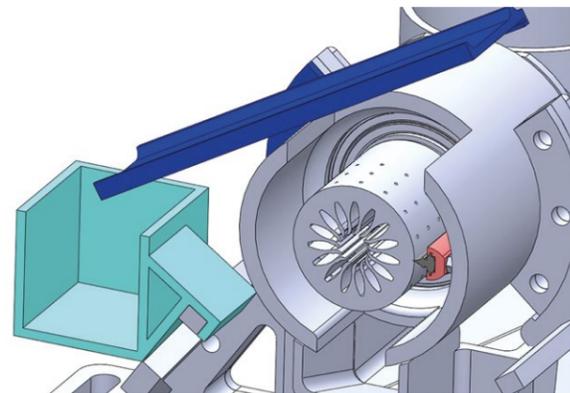
Abgeschleuderte Flüssigkeit wird über einen Abtropfschirm aufgefangen und fließt daran entlang in das Auffangbecken. In Testläufen wurde festgestellt, dass ein hoher Anteil der abgeschleuderten Flüssigkeit durch den Effekt der Oberflächenadhäsion an der Wellenaußenseite entsteht. Zur Abhilfe wurde eine Abstreiflippe montiert, die auf Höhe der Wellenrotationsachse den Flüssigkeitsfilm abstreift (vgl. Abbildung 2.32).

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG

Das Ziel der Prüfung ist es, eine Aussage über die abgeschleuderte Flüssigkeitsmenge, abhängig von der Drehzahl der Welle, treffen zu können. Für die Untersuchung wurde die Welle mit unterschiedlich definierten Drehzahlen jeweils 10 Sekunden rotiert. Anschließend wurde die aufgefangene Flüssigkeitsmenge gemessen. Weiterhin wurde der Einfluss mit und ohne Abstreiferlippe betrachtet, um den Einfluss der Oberflächenadhäsion auf die Fluidförderwirkung feststellen zu können (vgl. Abbildung 2.33).



2.31 SONNENRAD MIT SCHMALEN, TROPFENFÖRMIGEN KAVITÄTEN MIT BREITEN AUSTRITTSKANÄLEN UND EINGREIFSCHAUFEL



2.32 PRÜFSTAND MIT ABTROPFSCHIRM (DUNKELBLAU), ABTROPFBECKEN (TÜRKIS) UND ABSTREIFLIPPE (ROT)

In der qualitativen sowie der quantitativen Überprüfung ist deutlich zu erkennen, dass die Abstreiflippe einen starken Einfluss auf die Verteilung und Menge der abgeschleuderten Flüssigkeit hat. Ein Großteil der austretenden Flüssigkeit wird aus den ersten Kanälen entlang der Wellenachse abgegeben. Damit ergibt sich ein über die Wellenlänge inhomogenes Flüssigkeitsaustrittsprofil, da im Anwendungsfall der Flüssigkeitseintritt einseitig stattfindet. Das Diagramm zeigt die austretende Flüssigkeitsmenge abhängig von der vorgegebenen Wellendrehzahl. Die Kurven steigen ab der Drehzahl 500 1/min deutlich an (vgl. Abbildung 2.34).

Die Machbarkeitsstudie zeigt, dass komplexe fluidfördernde Strukturen durch AM hergestellt werden können, die eine signifikante Fluidförderung infolge der Fliehkraft bieten. Dadurch ist die technische Umsetzbarkeit erfolgreich aufgezeigt. Über das Projekt hinaus muss der Einfluss der Kanäle, der innenliegenden Schaufelstrukturen sowie Kanalaustrittsbereiche im Zahnfuß mechanisch und fluid-dynamisch betrachtet werden.

VERBESSERUNG DER WÄRMEÜBER- TRAGUNG DURCH HERSTELLUNG FILIGRANER STRUKTUREN MITTELS LPBF

MOTIVATION UND ZIELE

Das LPBF bietet gegenüber klassischen Verfahren den Vorteil, sehr filigrane und hochkomplexe Strukturen herzustellen. Dadurch können Strukturen gestaltet werden, die eine neuartige Umsetzung von bestehenden Wirkprinzipien ermöglichen, wodurch z.B. eine signifikante Verbesserung der Wärmeübertragung einhergehen kann.

Gerade im Bereich der Fluidodynamik sind gekrümmte Oberflächen und abgerundete Kanten vorteilhaft gegenüber abrupten

Änderungen der Oberflächenorientierung und scharfen Kanten, die zu hohen Druckverlusten und turbulenten Strömungsverhalten führen können.

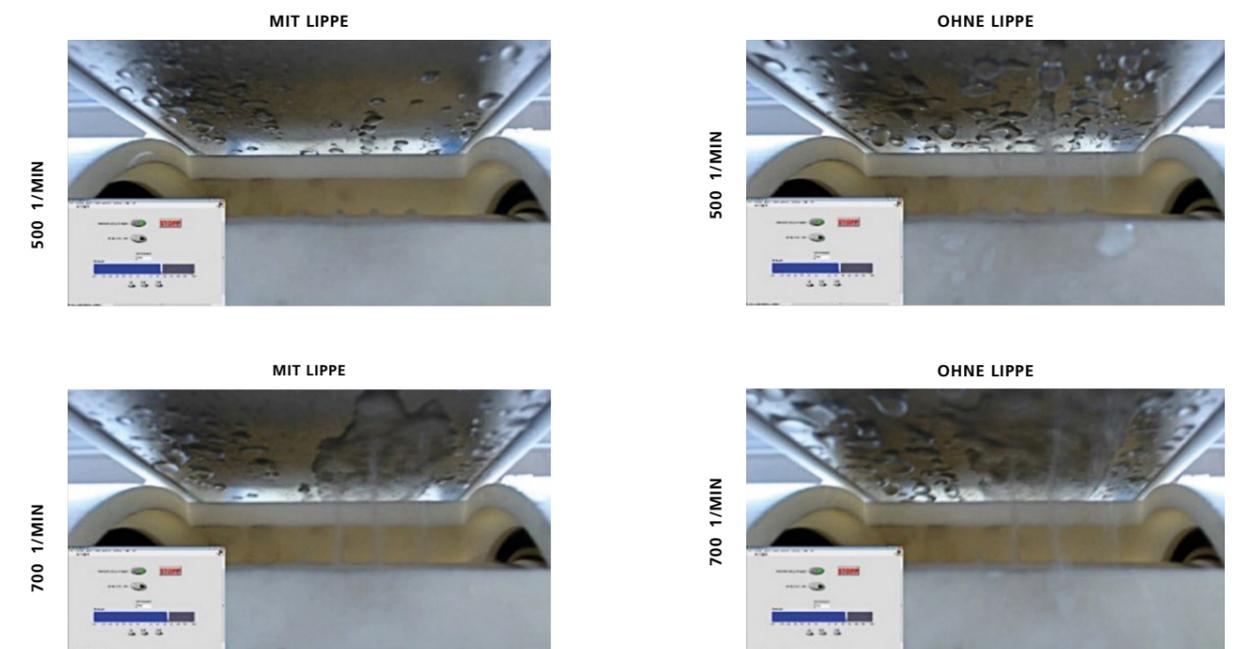
Ziel ist es, eine funktions- und fertigungsgerechte Gestaltung von Strukturen zur Wärmeübertragung zu erarbeiten. Darauf aufbauend sollen die Ergebnisse anhand eines Kraftstoffkühlers von dem Unternehmen John Deere validiert werden. Hierbei handelt es sich um die Auslegung eines Flüssigkeit-Flüssigkeit-Wärmetauschers, der den Kraftstoff eines landwirtschaftlichen Nutzfahrzeuges dezentral kühlen soll.

PROBLEMLÖSUNG

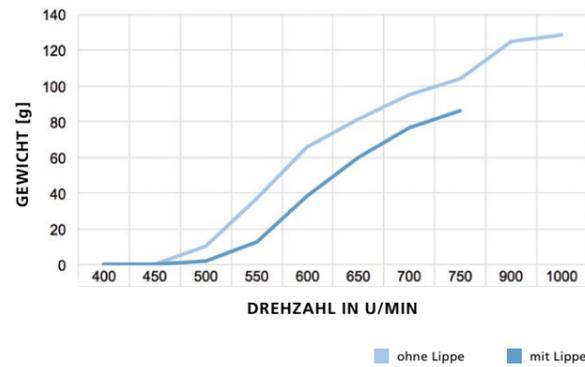
Zu Beginn der Untersuchung wurden Grundlagen zur fertigungsgerechten Gestaltung erforscht. Dabei wurden minimale Kanalquerschnitte (Kreise und Quadrate) und Wanddicken im LPBF in unterschiedlichen Orientierungen mit dem Material AlSi10Mg experimentell ermittelt. Anhand der definierten Restriktionen wurden Kanalanordnungen und -querschnitte in 2D sowie 3D mittels CFD-Analyse simuliert, um eine funktionsgerechte Auslegung zu gewährleisten. Für die Simulation wurden weiterhin die Oberflächenrauheiten in unterschiedlichen Orientierungen untersucht (siehe 5.17 f.). Die Ergebnisse der funktions- und fertigungsgerechten Gestaltung wurden an dem Kraftstoffkühler validiert. Der entsprechend gestaltete Kraftstoffkühler wurde abschließend simuliert und mittels LPBF hergestellt.

EXPERIMENTELLE UND SIMULATIVE UNTERSUCHUNG

Die experimentellen Untersuchungen gliedern sich in folgende Themengebiete:



2.33 QUALITATIVER VERGLEICH MIT UND OHNE ABSTREIFLIPPE BEI UNTERSCHIEDLICHEN DREHZAHLEN



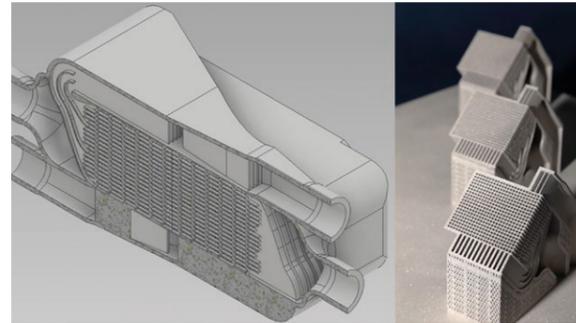
2.34 ABTROPFMASSE IST ÜBER EINE STEIGENDE DREHZAHL DARGESTELLT; VERGLEICH VERSUCHSAUFBAU „MIT“ UND „OHNE“ ABSTREIFLIPPE

Fertigungsgerechte Gestaltung:

Nach der Herstellung von unterschiedlichen Wanddicken zwischen 0,2 bis 1,0 mm in 0,1 mm Schritten, wurden die Ist-Wanddicken mittels Bügelmessschraube vermessen. Es zeigten sich besonders hohe Übermaße bei kleinen Wanddicken in einer Orientierung von 45°. Aus geometrischer Sicht sollten Wanddicken nicht kleiner als 0,4 mm für die Orientierung 45° und 90° ausgelegt werden. Um die mechanischen Aspekte zu berücksichtigen, wurden die Wände mittels CT untersucht. Basierend auf den erzielbaren Materialdichten wurde eine minimale Wanddicke von 0,6 mm für die Auslegung des Kraftstoffkühlers festgelegt. Minimale zulässige Kanalquerschnitte konnten für einen Durchmesser bzw. eine Kantenlänge von 1,0 mm identifiziert werden, um einen Flüssigkeitsdurchlass im Kanal zu ermöglichen (Abbildung 2.36).

Funktionsgerechte Gestaltung und Auslegung des Kraftstoffkühlers:

Die Gestaltungsfreiheit der additiven Fertigung sollte genutzt werden, um die Leistungsdichte zu erhöhen und damit den Platzbedarf



2.35 ISOMETRISCHE CAD-SCHNITTANSICHT (LINKS) UND HERGESTELLTER TEILBEREICH DES KRAFTSTOFFKÜHLERS AUS ALSI10MG (RECHTS)

und das Gewicht des Kraftstoffkühlers zu reduzieren. Zu diesem Zweck wurde eine wechselnde Anordnung der heißen und kalten Kanäle in einer Ebene mit einem quadratischen Querschnitt ausgewählt. Folgende Schritte wurden durchgeführt:

Festlegung des Bauraums vom Wärmetauscher:

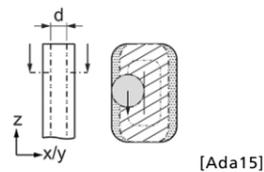
- Entwurf einer Verteilergeometrie, die alle Strömungskanäle erreicht und die vorgegebenen konstruktiven Vorgaben erfüllt (vgl. Abbildung 2.36)
- Auswahl geeigneter Modelle und Randbedingungen für die CFD-Simulationen, Erzeugung eines Volumennetzes
- Simulation des Entwurfs
- Iterative Identifizierung problematischer Geometriemerkmale und Anpassung der Gestalt
- Simulation der angepassten Gestalt

KONSTRUKTIONSRICHTLINIE FÜR LPBF

Die Dicke von Wänden sollte so groß sein, dass jede Bauteilschicht aus einer Kontur mit einbeschriebenem Raster aufgebaut werden kann.

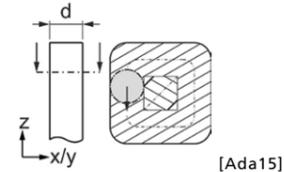
AlSi10Mg:
d ≥ 0,6 mm

NICHT FERTIGUNGSGERECHT



[Ada15]

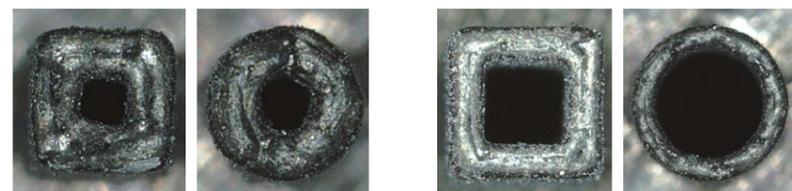
FERTIGUNGSGERECHT



[Ada15]

Die Querschnittsfläche von Kanälen sollte über den Innendurchmesser (d) oder die Innenbreite (b) so groß gewählt werden, dass eine Pulverentfernung und ein Flüssigkeitsdurchlass ermöglicht wird.

AlSi10Mg:
d bzw. b ≥ 1,0 mm

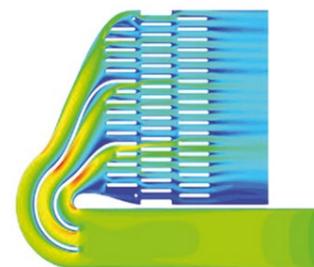
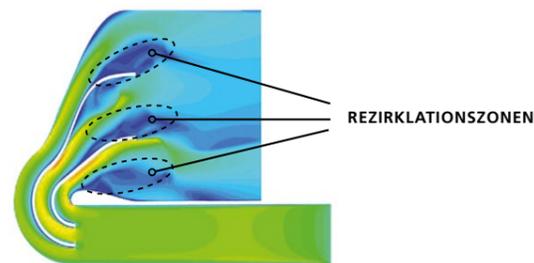
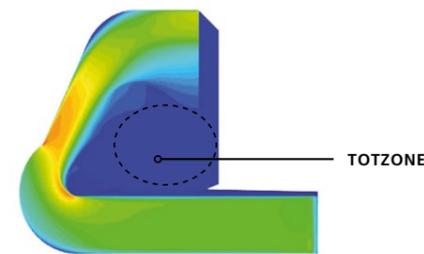


2.36 KONSTRUKTIONSRICHTLINIEN FÜR DIE BASELEMENTE „WAND“ UND „KANAL“

Durch die iterative Gestaltung von verschiedenen Diffusorstufen zur homogenen Flüssigkeitsverteilung von Eingangsquerschnitt auf die ebenenweise angeordneten quadratischen Kanäle können Tot- und Rezirkulationszonen vermieden werden.

Hinter der finalen Verteilergeometrie wurden alle Kanäle geradlinig bis zum Einlaufen in die Sammelgeometrie geführt. Unter Berücksichtigung der fertigungs- und nachbearbeitungsgerechten Restriktionen, wie z.B. Pulverentfernung, konnte so der gesamte Kraftstoffkühler funktions- und fertigungsgerecht gestaltet werden. Abbildung 2.35 zeigt eine Schnittansicht des Entwurfs sowie die hergestellten Teilhalbschnitte.

Daraus kann gefolgert werden, dass durch die Fertigung mittels LPBF eine wesentlich kompaktere Bauform erreicht werden kann, allerdings zum jetzigen Zeitpunkt bei wesentlich höheren Fertigungskosten und höheren Druckverlusten. Die Simulationen zeigten vielversprechende Ergebnisse, die über das Projekt hinaus durch experimentelle Studien realistisch zu bewerten sind.



2.37 GESCHWINDIGKEITSKONTURDIAGRAMME IN DEN UNTERSCHIEDLICHEN VERTEILERGEOMETRIEN



PROJEKT-ANSPRECHPARTNER BEI JOHN DEERE
PHILIPP SURREY
ADVANCED MANUFACTURING ENGINEER
SURREYPHILIPP@JOHNDEERE.COM



PROJEKT-ANSPRECHPARTNER UNIVERSITÄT PADERBORN, KONSTRUKTIONS- UND ANTRIEBSTECHNIK
TOBIAS LIENEKE
WISSENSCHAFTLICHER MITARBEITER
TOBIAS.LIENEKE@UPB.DE



PROJEKT-ANSPRECHPARTNER UNIVERSITÄT PADERBORN, KONSTRUKTIONS- UND ANTRIEBSTECHNIK
THOMAS KÜNNEKE
WISSENSCHAFTLICHER MITARBEITER
THOMAS.KUENNEKE@UPB.DE

PLANUNG UND OPTIMIERUNG HYBRID-ADDITIVER TECHNOLOGIEKETTEN

MOTIVATION UND ZIELSTELLUNG

Neue Fertigungstechnologien ermöglichen Unternehmen neue Möglichkeiten zur Herstellung bisheriger Produkte und eröffnen darüber hinaus auch die Realisierung neuartiger Produktdesigns und -funktionen. In diesem Kontext lassen sich auch additive Fertigungstechnologien, wie das pulverbettbasierte Laserstrahlschmelzen (LPBF) einordnen.

Hierbei ist insbesondere in der Produktentwicklung und der Technologieplanung die Frage zu beantworten, welche Fertigungstechnologien für welche Produkte und Produktelemente, bzw. Produktmodule, eingesetzt werden sollen. Dabei birgt die Kombination urformender Herstellverfahren mit additiven Fertigungstechnologien innerhalb eines Bauteils ein enormes wirtschaftliches Potential. Im Folgenden wird eine Methodik vorgestellt, die die Freiheitsgrade von Fertigungstechnologien und Produktentwurf zur wirtschaftlichen Optimierung der Produktion nutzt (Jacob et al 2018). Diese Methodik wird in den folgenden Kapiteln angewendet und mit dedizierten Ablaufsimulationen verglichen, um das Potential hybrid-additiver Fertigungstechnologieketten effektiv aufzuzeigen.

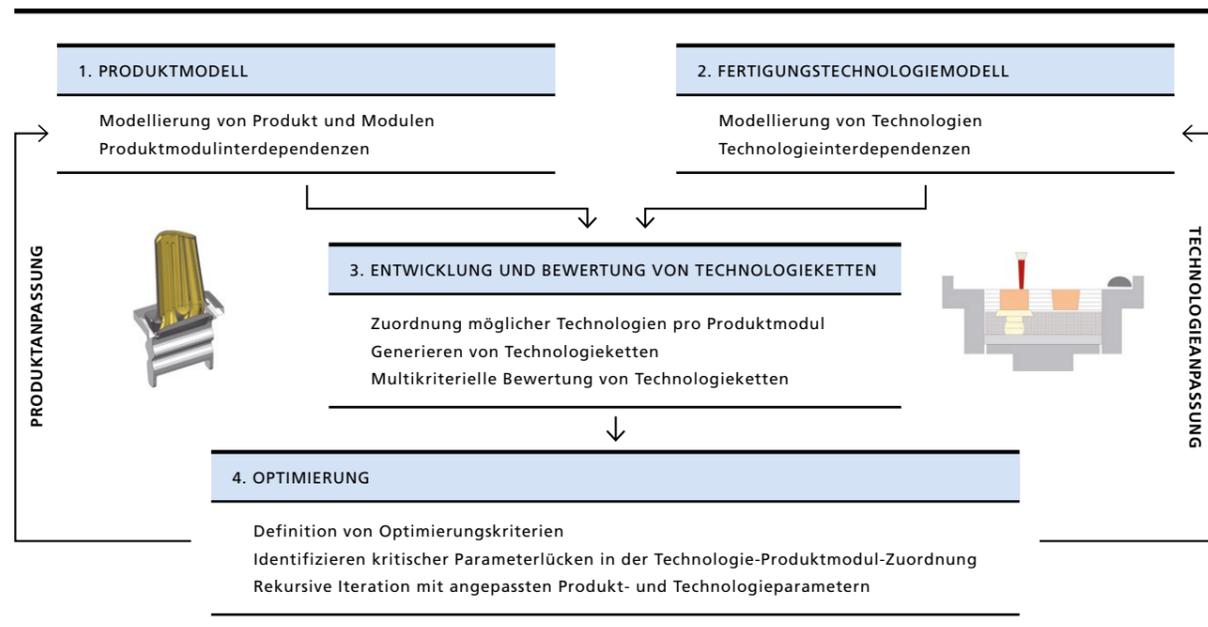
VORGEHENSMODELL

Die Methodik zur Planung und Optimierung der Technologieketten ist in Abbildung 3.1 zusammenfassend dargestellt. Zu Beginn wurde ein Produktmodell sowie ein Fertigungstechnologiemodell entwickelt, welche basierend auf Ansätzen der objektbasierten Modellierung wiederholt verwendet werden können, um beliebige Produkte und Fertigungstechnologien abzubilden. Diese Modelle dienen als Input zur Planung und Bewertung möglicher

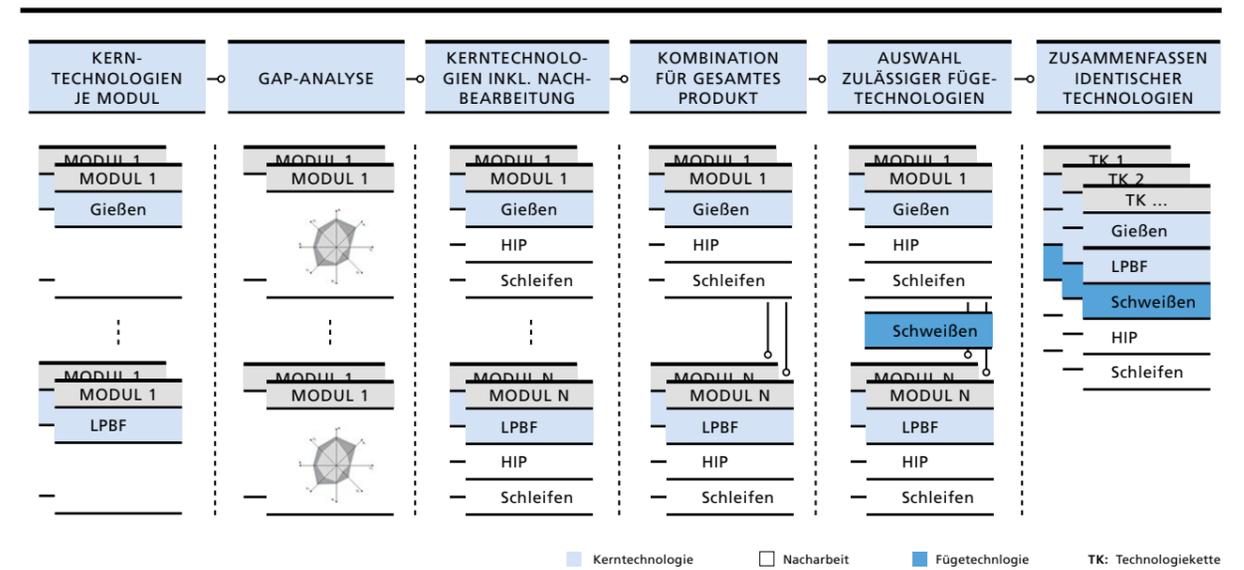
alternativer Fertigungstechnologieketten für die Herstellung eines spezifizierten Produkts.

Die Generierung der Technologiekettenalternativen basiert auf einem mehrstufigen Vergleich der Produktanforderungsparameter mit den Technologieleistungsparametern und ist in Abbildung 3.2 dargestellt.

Es werden in Anlehnung an die DIN 8580 die Fertigungstechnologien und die Produktanforderungsparameter in drei Klassen geteilt. Zu Beginn wird für jedes Produktmodul geprüft, ob es eine urformende Kerntechnologie gibt, die die allokierten, urformrelevanten Produktparameter herstellen kann. Als Ergebnis ergeben sich unterschiedliche Kerntechnologien je Produktmodul. Daraufhin erfolgt die Allokation von möglichen Nachbearbeitungstechnologien für die zuvor bestimmte Kerntechnologien je Modul. Dabei werden alle Produktparameter zum Vergleich herangezogen und die Technologieinterdependenzen berücksichtigt. Es resultieren alternative, modulspezifische Technologieketten bestehend aus Kerntechnologie inkl. Nachbearbeitung. Anschließend werden die modulspezifischen Technologieketten zu Technologieketten für das gesamte Produkt verknüpft. Daraufhin werden diese Technologieketten auf Basis der Informationen von physischen Schnittstellen hinsichtlich der Notwendigkeit von Füge-technologien analysiert und diese auf Basis eines weiteren fügespezifischen Parametervergleichs gegebenenfalls hinzugefügt. Abschließend erfolgen eine Zusammenfassung von identischen Technologien innerhalb einer Technologiekette und eine Überprüfung der finalen Erfüllung aller Produktanforderungen. Im Ergebnis liegen unterschiedliche, technisch valide Technologiekettenalternativen zur Herstellung eines Produktes vor. Die Auswahl



3.1 PLANUNG UND OPTIMIERUNG HYBRIDER TECHNOLOGIEKETTEN



3.2 GENERIERUNG VON TECHNOLOGIEKETTENALTERNATIVEN

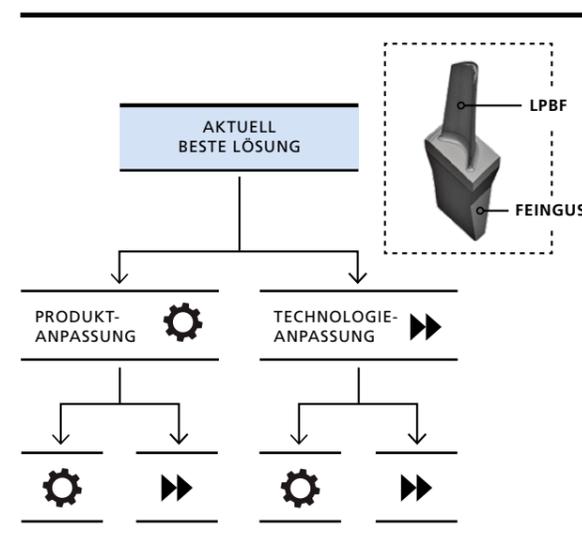
der optimalen Technologiekette wird mittels des multikriteriellen Entscheidungsverfahrens TOPSYS durchgeführt werden. Die optimale Technologiekette und das dazugehörige Produkt werden als Ausgangspunkt für eine Optimierung genutzt. Dabei werden zuerst durch eine Gap-Analyse minimal verfehlte Produktanforderungen sowie die korrespondierenden Leistungsfähigkeiten der Technologien identifiziert. Diese werden anschließend schrittweise, soweit die Freiheitsgrade im Produktentwurf und der Technologie dies zulassen, angepasst und neue Technologieketten erstellt. Iterativ wird dieser Ablauf mit einem geänderten Produktmodell und geändertem Fertigungstechnologiemodell durchlaufen, sodass zusammenfassend über alle Iterationen ein Suchbaum entsteht. Abbildung 3.3 stellt einen exemplarischen Suchbaum dar. Der iterative, rekursive Optimierungsablauf terminiert, wenn zuvor definierte Zielkriterien erreicht werden oder keine Verbesserung der Zielkriterien mehr möglich ist. Anhand des Suchbaums, der die Historie der Iterationen darstellt, kann nachvollzogen werden durch welche Kombination von Produkt- und Technologieanpassung

gen die optimale Lösung in Form einer Technologiekette, des entsprechenden Produktmodells und der entsprechenden Fertigungstechnologiemodelle generiert wurde.

ANWENDUNG IN DER TECHNOLOGIEPLANUNG

Das konzipierte Vorgehensmodell wurde anhand von drei Demonstratoren angewendet. Die Ergebnisse der modellbasierten Optimierung werden den realen Möglichkeiten der Produkt- und Technologieentwicklung gegenübergestellt und kritisch bewertet. Dies umfasst sowohl die Validierung der durch die Methode erarbeiteten Produktanpassungen, als auch die Prüfung der vorgeschlagenen Technologieketten und Technologieanpassungen. Es handelt sich dabei um folgende Demonstratoren, die sich insbesondere durch neuartige Produktfunktionskonzepte auszeichnen (vgl. Kapitel 1):

- eine Turbinenschaufel mit neuartigen Kühlkanälen zur Verbesserung des Gasturbinenleistungsgrads der Firma Siemens
- ein Zahnrad mit innenliegender Gitterstruktur zur Gewicht- und Geräuschreduktion in Automobilanwendungen der Firma GKN
- ein Sonnenrad mit innenliegenden Ölkanälen zur Steigerung der Schmierung im Planetengetriebe einer Landmaschine der Firma John Deere.



3.3 EXEMPLARISCHER SUCHBAUM FÜR DIE TECHNOLOGIEKETTENOPTIMIERUNG

Die folgenden Kapitel stellen die Anwendung der Technologieplanungsmethodik anhand der Demonstratoren detailliert dar.



PROJEKT-ANSPRECHPARTNER
BEIM WBK INSTITUT FÜR
PRODUKTIONSTECHNIK AM KIT
ALEXANDER JACOB
WISSENSCHAFTLICHER MITARBEITER
ALEXANDER.JACOB@KIT.EDU

AUTOR: MARTIN SCHÄFER

FALLBEISPIEL SIEMENS: DIE GASTURBINENSCHAUFEL IM HYBRIDEN AUFBAU

Bislang wurde die additive Fertigung noch kaum in bestehende Produktionsstrukturen integriert, da noch einige Entwicklungsmaßnahmen nötig sind. Zum Beispiel sind Schritte der additiven Prozessketten, wie bspw. die Zuführung des Druckmaterials an die AM-Maschine oder die Entnahme der Objekte nach dem Druck, noch nicht ausreichend automatisiert, um diese Verfahren in einer automatisierten Serienproduktion einsetzen zu können. Außerdem sind Qualitätssicherungstools zu integrieren, wie bspw. zerstörungsfreie Prüfverfahren, um weiterhin eine hohe Qualität der Produkte gewährleisten zu können. Zudem sind additive Fertigungsverfahren noch sehr kostenintensiv im Vergleich zu konventionellen Verfahren. Ein erster Schritt der Integration von additiven Fertigungsverfahren in die bestehende Produktion ist die Kombination additiver Verfahren mit konventionellen Fertigungstechnologien. Bauteile werden zu Beginn bzgl. ihre Eignung für die Fertigung mit additiven und konventionellen Technologien bewertet. Im Anschluss wird in Abhängigkeit der charakteristischen Bauteilkriterien ein passendes Verfahren ausgewählt. Urformende und spanende Fertigungsverfahren kommen bspw. in den Bereichen zum Einsatz, in denen sie wirtschaftlicher im Vergleich zur additiven Fertigung sind. Dies sind meist Fertigungsverfahren, die einfache Bauteilstrukturen fertigen können. Die additive Fertigung eignet sich im Gegensatz dazu für die Fertigung komplexer Bauteilstrukturen. Mit konventionellen Verfahren sind komplexe Bauteilstrukturen oft nur mit Hilfe mehrerer Fertigungsverfahren zu fertigen. Additive Fertigungsverfahren können hier zu Kosteneinsparungen führen und die Fertigungszeit reduzieren. Dies wird im Folgenden analysiert.

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden zum einen Ablaufsimulationen basierend auf realen Prozessfolgen durchgeführt und zum anderen Technologieketten durch Anwendung einer eigenen Methodik gebildet. Der Unterschied zwischen Technologie- und Prozessketten ist, dass Technologieketten keine nicht-wertschöpfende

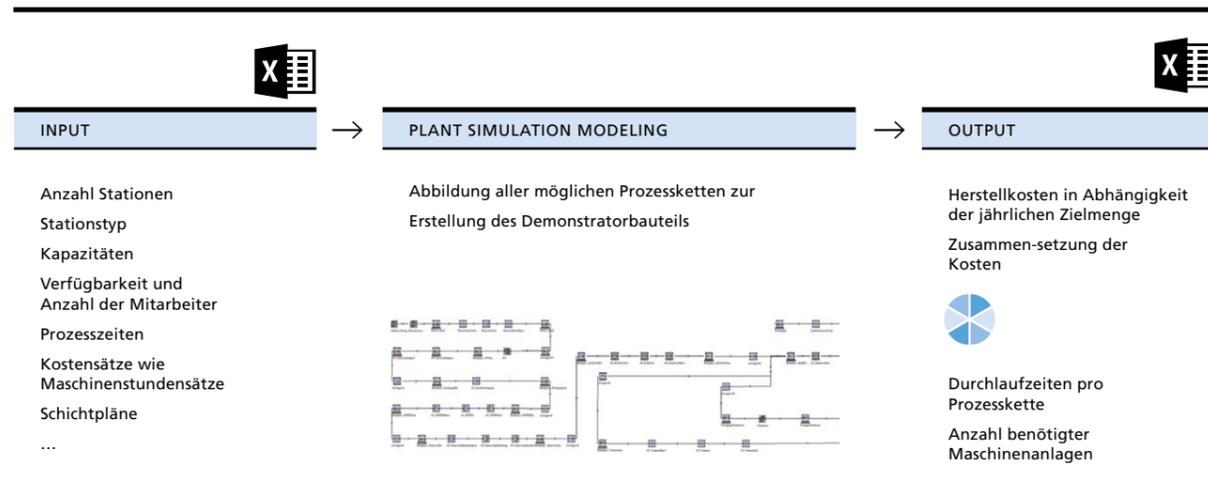
Tätigkeiten abbilden, wie z.B. Handhabungs- und Transportschritte. Mit der zuvor vorgestellten Methodik können Technologiekettenalternativen wesentlich schneller aufgestellt und bewertet werden, als durch die Modellierung prozesskettenbezogener Ablaufsimulationen.

ABLAUFSIMULATION DER PROZESSKETTEN

Zur Abbildung der Ablaufsimulationen wurde auf das Programm Tecnomatix Plant Simulation® zurückgegriffen, das Bestandteil der Digitalen Fabrik der Siemens Plm Software ist. Um diversen Nachteilen, wie der eingeschränkten Flexibilität bei der Softwarenutzung, entgegenzuwirken, wurde das Tool mit der Software Microsoft Excel verknüpft. Durch diesen Aufbau des Softwarewerkzeugs können neben der Optimierung von Prozessketten und Erzielung der Bewertbarkeit und Vergleichbarkeit der Prozessketten noch weitere Kriterien berücksichtigt werden. Beispielhaft sind hier der modulare Aufbau der Methodik zur Förderung der Wiederverwendbarkeit oder die ganzheitliche Abbildung sämtlicher anfallender Kosten zu nennen.

Im Rahmen der Ablaufsimulationserstellung existieren zwei Softwareelemente: Ein Basismodul im Excelformat und das Plant Simulation®-Modul. Das Basismodul fungiert dabei als Datenbank der Input- und Outputdaten sowie als Benutzeroberfläche zur Steuerung der Simulation. Das Plant Simulation®-Modul ermöglicht das Abbilden und die Modellierung der Prozessketten (vgl. Abbildung 3.4).

Im Rahmen der Simulation werden verschiedene Prozessketten zur Herstellung der Turbinenschaufel betrachtet. Zuerst wird die rein konventionelle Fertigung betrachtet. Hier werden sowohl Schaufelblatt als auch -fuß per Feinguss hergestellt. Bei der hybriden Variante



3.4 ABLAUFsimulationen der Prozessketten

wird das Schaufelblatt mit dem additiven Fertigungsverfahren LPBF und der Schaufelfuß mit dem konventionellen Verfahren Feinguss gefertigt. Bei der additiven Prozesskette werden sowohl Schaufelblatt als auch -fuß per LPBF hergestellt. Des Weiteren werden Kapazitätsänderungen im Bauraum bei der hybriden und additiven Prozessketten untersucht. Bei der additiven Prozesskette wird bei der Variante 3.2 zudem der Schaufelfuß im Design optimiert. Die Varianten X.1 und X.2 unterscheiden sich in der Belegung des Bauraums mit einer (X.1) und mit vier Schaufeln in einem Baujob (X.2) (vgl. Abbildung 3.5).

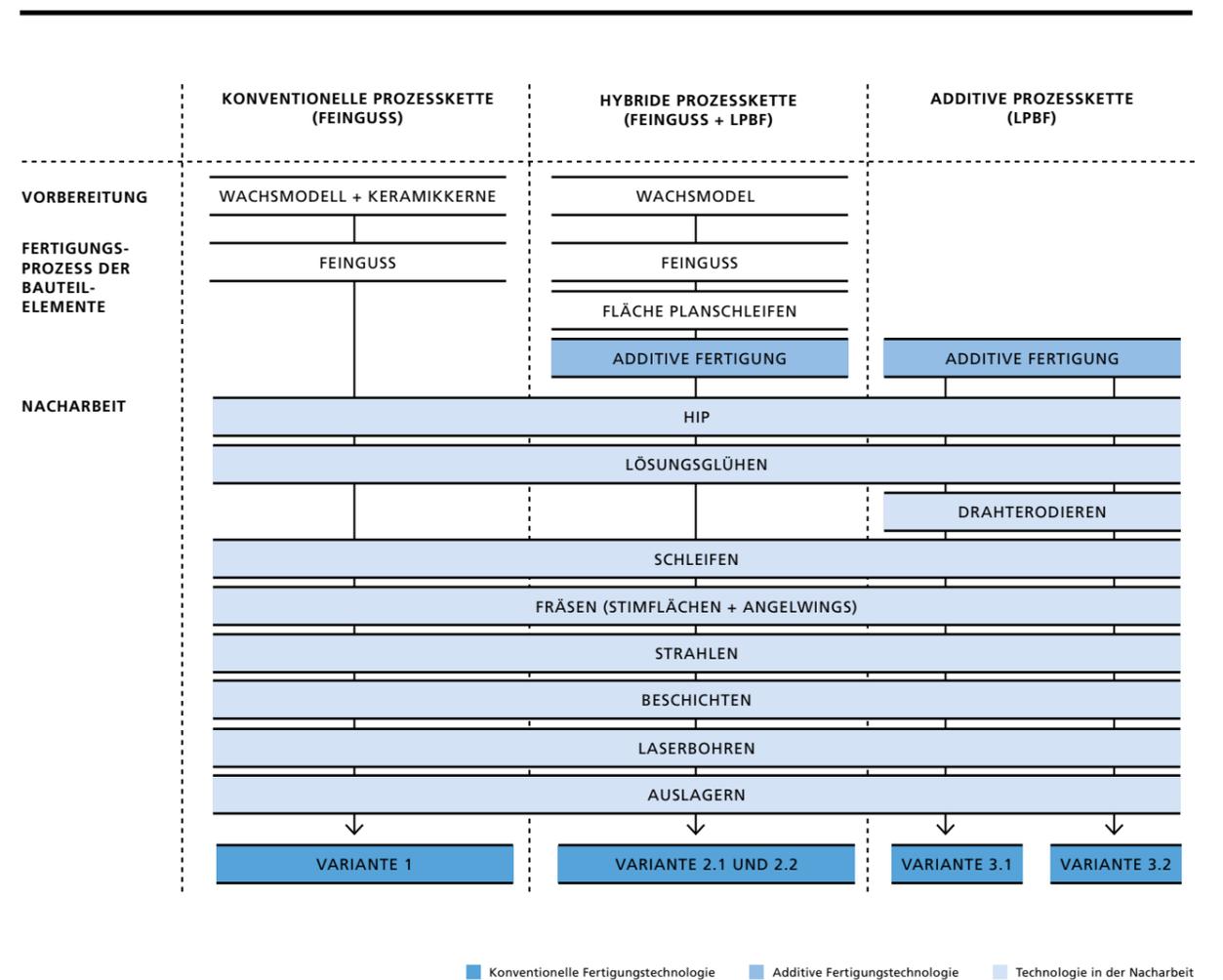
Der letzte Schritt ist der Vergleich der verschiedenen simulationsbasierten Prozessketten bzgl. Stückkosten und Durchlaufzeit in Abhängigkeit von einer zu berücksichtigenden Zielstückzahl von bis zu 1.000 Teilen pro Jahr (vgl. Abbildung 3.7). Aufgrund der komplexen Kühlkanäle ist es schwierig, diese konventionell zu fertigen. Aus Sicht der Konstruktion erscheint es sinnvoller, diese additiv und nicht mehr per Feinguss herzustellen. Wird die rein additive Prozesskette betrachtet, fällt auf, dass durch die Designanpassung des Schaufelfußes die Kosten um 50 % bei 100 Teilen gesenkt werden können. Allerdings sind die Kosten der hybriden Prozesskette im Vergleich zur additiven bei sowohl 100 Teilen als auch 1000 Teilen um 11 % günstiger. Werden die Durchlaufzeiten der fünf Varianten abgeglichen, fällt auf, dass die prozess- und produktseitige Optimierung der addi-

tiven Prozesskette zu einer 71 % niedrigeren Durchlaufzeit bei 100 Teilen als die erste additive Variante ergibt. Bei 1000 Teilen ist jedoch die hybride Prozesskette inkl. Kapazitätsanpassung zu bevorzugen, aufgrund der 41 % niedrigeren Durchlaufzeit als die zweite Variante der additiven Prozesskette. Daher wird ergibt sich aus den Ablaufsimulationen mit dem Plant Simulation-Modul die hybride Prozesskette zur Fertigung der Turbinenschaufel als wirtschaftlichste Variante.

PLANUNG UND OPTIMIERUNG DER TECHNOLOGIEKETTEN

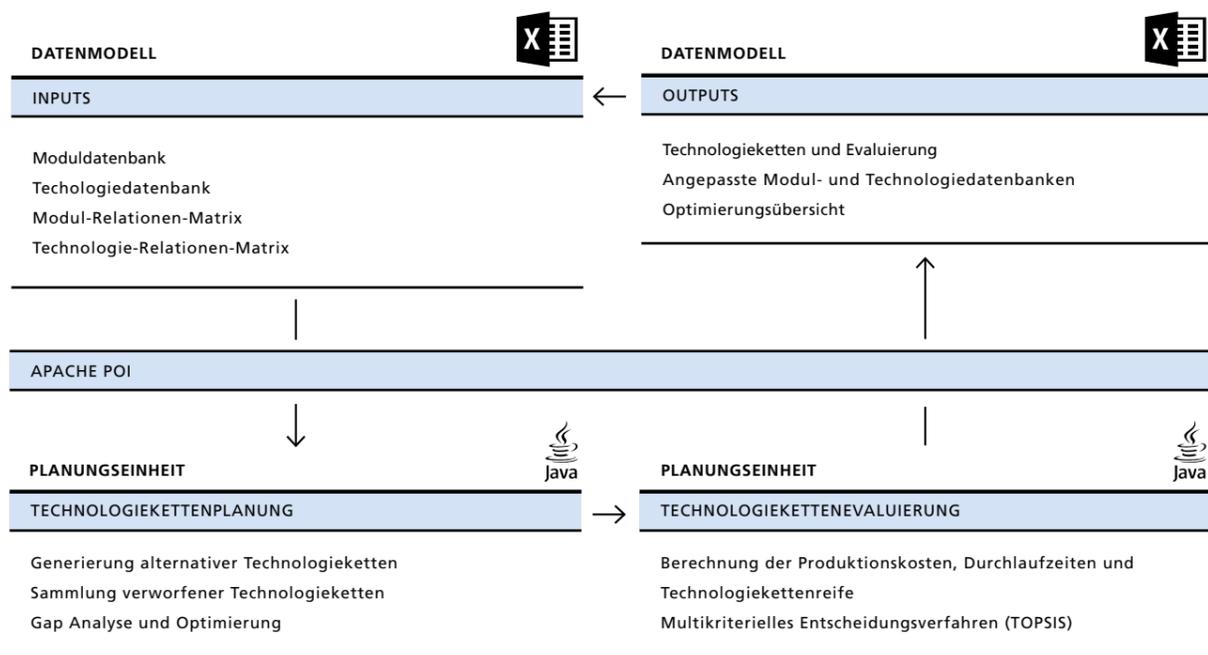
Um den Aufwand für derartige Entscheidungen auf Basis detaillierter Ablaufsimulationen zu reduzieren, wurde im Rahmen dieses Projekts ein automatisiertes Technologiekettenplanungstool unter Berücksichtigung der additiven Fertigung sowie mit integriertem Optimierungsalgorithmus für Produktmodule und Technologien entwickelt. Mit Hilfe dieses Technologiekettenplanungstool soll ein parametrisiertes Modell zur hoch-iterativen, rechnergestützten Planung und Bewertung von Technologieketten zur Verfügung gestellt werden.

Wie bei der Ablaufsimulation werden zwei Systeme miteinander verknüpft, um Technologieketten zu generieren. Beim eigenen



3.5 PROZESSKETTENALTERNATIVEN FÜR DAS SCHAUFELBLATT (PROZESSKETTE ENTSPRICHT DEMONSTRATORPRODUKTHERSTELLUNG)

ITERATIVE OPTIMIERUNG



3.6 SOFTWARESTRUKTUR DES TECHNOLOGIEKETTENPLANUNGSTOOLS

Ansatz wird hierbei auf Microsoft Excel zur Verwaltung aller Input- und Output-Daten zurückgegriffen. Die Inputdaten setzen sich zusammen aus der parametrisierten Moduldatenbank sowie der parametrisierten Technologiedatenbank. Die generierten Technologieketten inklusive ihrer TOPSIS-Bewertung werden in den Outputdateien ausgegeben. Zudem wird eine Optimierungsübersicht ausgegeben, in der die angepassten Daten jeder Iteration mit Angabe des TOPSIS-Wertes angegeben ist.

Für die Verarbeitung der Inputdaten und Ausgabe der Outputdaten wird in der Planungseinheit Java verwendet. Mit der Programmierschnittstelle, genannt Apache POI, können auf die Input-Exceldateien zum Auslesen der Daten zugegriffen und die Output-Daten geschrieben werden. Basierend auf wissenschaftlichen Veröffentlichungen generiert die Planungseinheit die Technologieketten und führt die TOPSIS-Bewertung durch. Anschließend werden verworfene Technologieketten gesammelt und ihre Lücken mit Hilfe der Gap-Analyse optimiert (vgl. Abbildung 3.6).

BEWERTUNGSKRITERIEN

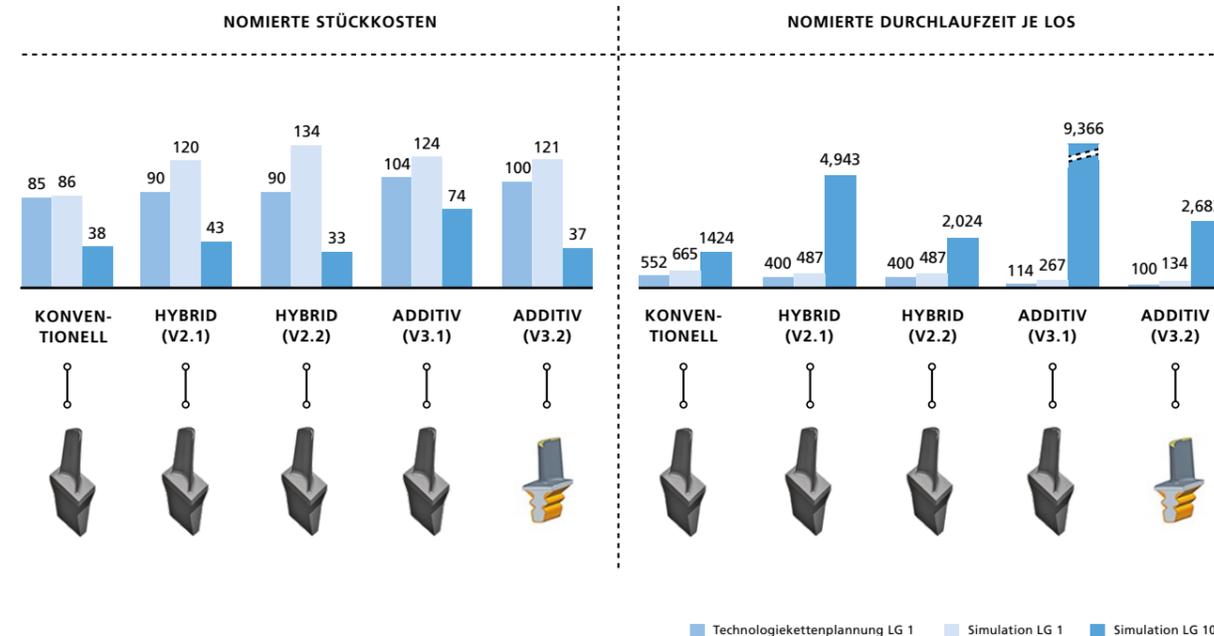
Bei der Anwendung des Softwareprototypen auf den Anwendungsfall der Fertigung der Turbinenschaufel, soll durch mehrere Optimierungsiterationen der Schaufelfuß optimiert werden. Dabei werden für das TOPSIS-Verfahren die Bewertungskriterien Wirtschaftlichkeit (60 %), Durchlaufzeit (20 %) und Technologiereife in Form des TRL (20 %) ausgewählt und wie dargestellt gewichtet.

ERGEBNISVERGLEICH

Nach der Durchführung der Simulationsstudien und der selbstentwickelten Technologiekettenplanungsmethodik lassen sich folgende Ergebnisse festhalten. In Abbildung 3.7 werden die Prozesszeiten und Kosten der Simulationsstudien und des Technologiekettenplanungstools für die verschiedenen Prozessketten aus Abbildung 3.5 gegenübergestellt.

Hierbei wird einerseits deutlich, dass die Daten des Technologiekettenplanung von den Simulationsdaten abweichen. Dies liegt begründet in der Tatsache, dass im Rahmen der Technologiekettenplanung maschinenübergreifende, unternehmensunabhängige Werte für die Technologiemodellierung verwendet wurden. Im Rahmen der Simulationsstudien wurden konkrete Maschinen und Unternehmensdaten verwendet. Zusätzlich wurde der Vergleich für unterschiedliche Losgrößen erstellt und beinhaltet auf Seiten der Prozessketten auch nicht wertschöpfende Tätigkeiten wie Lagerung und Transportzeiten.

Andererseits wird durch beide Vorgehensweisen der Vorteil der hybrid additiven Fertigung gegenüber der additiven Fertigung deutlich. Die Stückkosten der hybrid additiven Fertigung sind auf Basis der Technologiekettenplanung ca. 10 % günstiger als die rein additive Fertigung. Die gleiche Rangfolge lässt sich bei höheren Losgrößen auch für die Ergebnisse der Ablaufsimulationen ermitteln. Aufgrund des Gussengineerings und der Herstellung der Gusswerkzeuge ist die Durchlaufzeiten der hybriden Fertigung erst bei höheren Losgrößen schneller als die additive Fertigung.



3.7 VERGLEICH DER STÜCKKOSTEN UND PROZESSZEITEN FÜR DIE PROZESSKETTEN

OPTIMIERUNG DER PRODUKT- UND PRODUKTIONSBEZOGENEN FREIHEITSGRADE

Im Rahmen der Optimierung von Freiheitsgraden wurden automatisiert mehrere limitierende technische Parameter identifiziert und untersucht. Hierbei handelt es sich um die Zugfestigkeit bei Raumtemperatur, die gemittelte Rautiefe und die 1 %-Zeitdehnngrenzen nach 10.000 Stunden bei relevanten Temperaturen im Einsatzbereich.

Das Anpassen der Zugfestigkeit und der gemittelten Rautiefe dient dem Ermöglichen einer Technologiekette aus polykristallinem Feinguss, heiß-isostatischem Pressen und Lösungsglügen zur Fertigung des Schaufelfuß. Diese neue Technologiekette hat allerdings keinen Vorteil auf Basis der Bewertungskriterien Wirtschaftlichkeit, Durchlaufzeit und Technologiereife in Form des TRL ergeben. Die davon losgelöste Untersuchung der 1 %-Zeitdehnngrenze ergibt für das Schaufelblatt eine neue mögliche Technologiekette auf Basis von unikristallinem Feinguss in Kombination mit Verfahren zur Herstellung des Schaufelfusses. Auf Grund der Bewertungskriterien ist diese allerdings ebenfalls der ursprünglichen Lösung nicht vorzuziehen.

FAZIT

Im Rahmen dieses Projektes bei der Siemens AG konnte aufgezeigt werden, dass hybrid additive Prozessketten für die Serienproduktion komplexer Bauteile eine hohe wirtschaftliche Bedeutung haben. Der Einsatz des Technologiekettenplanungstools macht dieses Potential transparent und ermöglicht darüber hinaus die Bewertung möglicher Anpassungen der Produkthanforderungen und Technologieleistungsfähigkeit zur weiteren Produktionsverbesserung.



**PROJEKT-ANSPRECHPARTNER
BEI SIEMENS**
MARTIN SCHÄFER
SENIOR KEY EXPERT
MARTIN.SCHAEFER@SIEMENS.COM

AUTOR: RAMI FAROUN

FALLBEISPIEL GKN: ZAHNRADAPPLIKATION MIT GITTERSTRUKTUREN

Eine Validierung vom entwickelten Softwaretool erfolgte anhand des Demonstrators von GKN Powder Metallurgy. Bei der Validierung wurde der Demonstrator, wie bereits zuvor beschrieben, in drei Module unterteilt (vgl. Abbildung 3.8).

Um die veränderten Gegebenheiten durch verschiedene Werkstoffe zu berücksichtigen, fließen beeinflussende Werkstoffparameter direkt mit in die Technologieparameter. Die jeweiligen hinterlegten Technologien sind somit schon einem bestimmten Werkstoff zugeordnet. In der hier beschriebenen Validierung wurden alle Technologien mit Kennzahlen zum Werkstoff Stahl hinterlegt und genutzt. Für die Validierung wurden die Ergebnisse vom Software Tool mit den Ergebnissen einer mit der Software *Plantsim* erstellten Prozesskettensimulation verglichen.

Bei der Aufstellung der möglichen Technologieketten wurden alle Möglichkeiten von einer reinen herkömmlichen, über eine hybride bis zu einer rein additiven Fertigung aller Module betrachtet. Die Module werden in Kapitel 1 vorgestellt. Es ergeben sich vier mögliche Technologieketten: rein herkömmlich, rein additiv, hybrid Variante 1 (Insert durch AM) und hybrid Variante 2 (Insert + Nabe durch AM) (vgl. Abbildung 3.8).

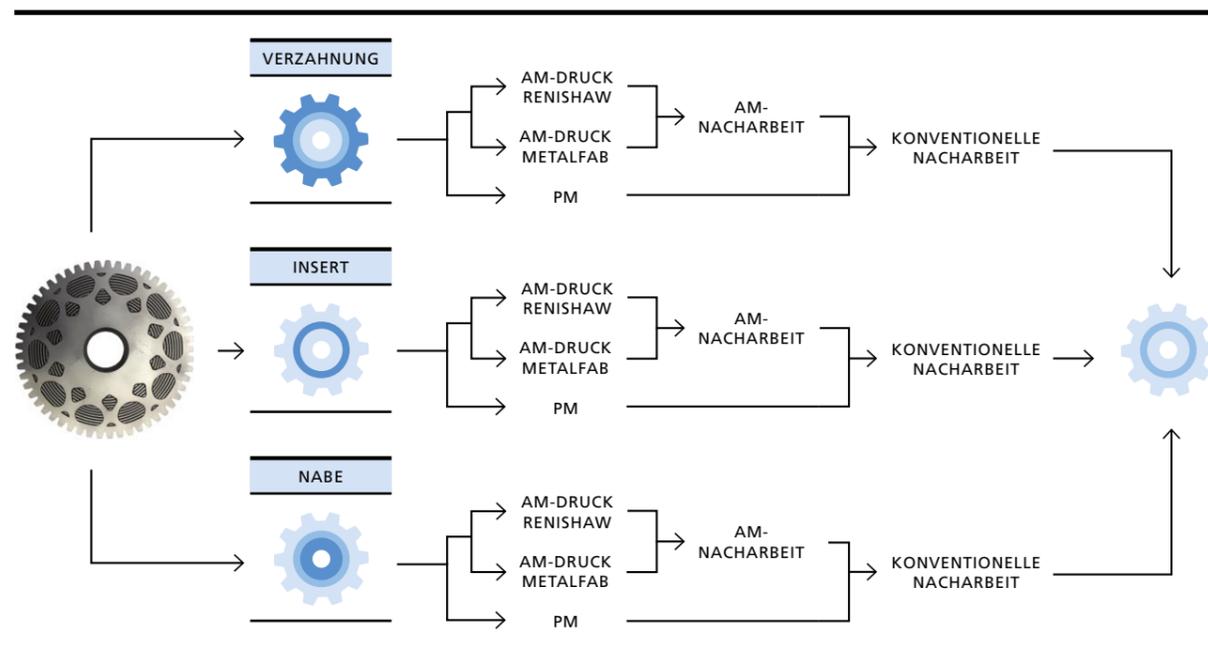
ABLAUFSIMULATIONSERGEBNISSE

Die Ablaufsimulationen mit *Plantsim* ergeben bei einem Vergleich einer kompletten AM-Prozesskette mit einer hybriden Prozess-

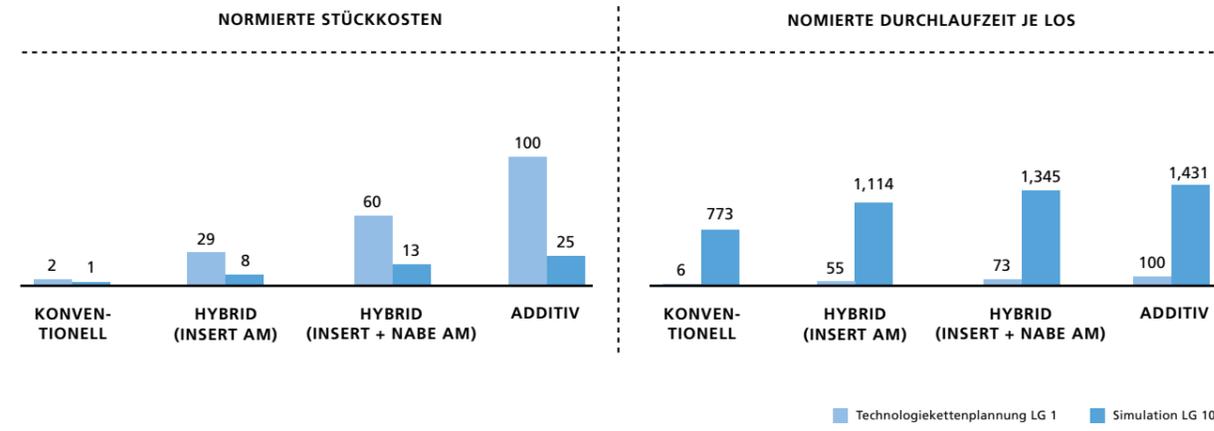
kette (Insert additiv gefertigt) eine deutliche Verbesserung der Stückkosten und Durchlaufzeiten. Die Stückkosten einer rein herkömmlichen Prozesskette sind deutlich niedriger als die der anderen Prozessketten. Die zweitgünstigste Prozesskette ist die hybride Variante, bei der das Insert additiv gefertigt wird. Bei einer Menge von 100 Stück erscheint eine hybride Fertigung um mehr als 40 % teurer als eine herkömmliche Fertigung. Es zeigt sich, dass die Prozessketten mit erhöhtem additivem Anteil zu erhöhten Stückkosten führen. Eine Erhöhung der Stückzahl führt zu einem stärkeren Sinken bei den herkömmlichen Prozessketten und zu einem geringeren Sinken der Stückkosten bei Prozessketten mit additivem Anteil. Es ist jedoch nicht zu vergessen, dass Produktvorteile, hier beim Insert, nur durch den Einsatz von additiver Fertigung erreichbar sind und eine reine Kostenbetrachtung zu verfälschten Rückschlüssen führen kann.

ERGEBNISSE DER TECHNOLOGIEKETTENPLANUNG

Im Rahmen der Technologiekettenplanungsmethodik wurden 32 unterschiedliche Technologieketten (TK) erzeugt. Als Bewertungskriterien wurden Stückkosten, Durchlaufzeiten und Technologiereifegrad gewählt. Hierbei werden im Folgenden vor allem die Technologieketten verglichen, die den betrachteten Ketten aus den Ablaufsimulationen entsprechen. Abbildung 3.9 stellt die Ergebnisse der Ablaufsimulationen und des Technologiekettenplanungstools anhand der Durchlaufzeiten und der Stückkosten dar.



3.8 PRODUKTMODULE UND PROZESSKETTENALTERNATIVEN



3.9 VERGLEICH DER KOSTEN UND DURCHLAUFZEITEN

Die Unterschiede zwischen den Ablaufsimulationsergebnissen sind hierbei einerseits auf die maschinenübergreifenden Technologiekettenplanungsansätze der Technologiekettenplanungsmethode zurückzuführen. Außerdem ist die Betrachtung unterschiedlicher Losgrößen ein Grund für die Unterschiede. Die Rangfolge der Technologiekettenalternativen wird dabei hinsichtlich der Durchlaufzeit und der Stückkosten sowohl von den Simulationsergebnissen als auch von der Technologiekettenplanungsmethodik übereinstimmend berechnet.

Die hybride Technologiekette, die die für die Herstellung der Gitterstrukturen in Frage kommt und unter diesen wirtschaftlich am besten ausfiel, kombiniert die Kerntechnologien LPBF und Pressen. Nach dieser Technologiekette ist das Insert mit LPBF zu fertigen und die Nabe und die Verzahnung durch Pressen. Der anschließende Zusammenschluss aller Module erfolgt durch gemeinsames Sintern.

Die vom Softwaretool ermittelten Stückkosten lagen demnach am geringsten bei einer reinen herkömmlichen Fertigung (ohne Fertigbarkeit der Gitterstruktur) und am höchsten bei einer rein additiven Fertigung. Im Vergleich zu einem rein additiv gefertigten Produkt sind die Stückkosten bei einer hybriden Fertigung mittels AM-gefertigtem Insert um ca. 67 – 71 % geringer, je nach Kalkulationsweise.

OPTIMIERUNG VON PRODUKT- UND PRODUKTIONSBEZOGENEN FREIHEITSGRADEN

Als Beispiel zur Optimierung der Freiheitsgrade mittels des Technologiekettenplanungsvorgehens soll an dieser Stelle die genaue Betrachtung der Härte beim Vergleich von zwei generierten Technologieketten dienen. Die geforderte Härte von 30 HRC kann von der Technologie „Pressen“ (9 HRC bzw. 11,4 HRC nach dem Sintern) nicht gewährleistet werden. Bei der Verwendung von LPBF als Fertigungstechnologie kann fast direkt die geforderte Härte erreicht werden (29,8 HRC). Derartige technische Parameter können direkt identifiziert und hinsichtlich ihrer Auswirkung bewertet werden.

FAZIT

Die geschilderten Berechnungen zeigen, dass das Technologiekettenplanungstool in verschiedenen Szenarien genutzt werden kann. Vor allem die Rangfolge der Technologiekettenalternativen lässt sich dadurch schnell feststellen. Durch das Technologiekettenplanungstool kann bei fehlerfreier Modellierung die technische und wirtschaftliche Perspektive für eine Fertigungsentscheidung mit einbezogen werden.

Sowohl Abteilungen, die in der Serienproduktion Expertenwissen in der herkömmlichen Produktion besitzen, als auch Experten für additive Fertigung können ohne Einblicke in den jeweiligen anderen Bereich die Möglichkeiten der hybriden Fertigung einschätzen. Durch die Umsetzung der Technologieketten mit Versuchen wurde ebenfalls gezeigt, dass die Ergebnisse vom Softwaretool technisch umsetzbar sind, jedoch nicht im Technologieplanungstool abbildbare Schwierigkeiten bei dem Zusammenfügen der Module auftreten können.



**PROJEKT-ANSPRECHPARTNER
BEI GKN SINTER METALS**
RAMI FAROUN
ENTWICKLUNGSINGENIEUR ADDITIVE
MANUFACTURING
RAMI.FAROUN@GKNPM.COM

AUTOR: PHILIPP SURREY

FALLBEISPIEL JOHN DEERE: INNENLIEGENDE ÖLKANÄLE FÜR EIN SONNENRAD

Die Firma John Deere untersuchte hybrid gefertigte Sonnenräder von Planetengetrieben, die sich im Endantriebsstrang von Maschinen für die Landtechnik befinden. Sonnenräder dienen der Kraftübertragung zwischen dem Differentialgetriebe und den Hinterädern, wodurch sie hohen Belastungen ausgesetzt werden. Die Zahnflanken konventionell gefertigter Sonnenräder erhalten eine Schmierung durch eine Tauchschmierung im Ölsumpf. Diese soll die ausreichende Benetzung der Zahnflanken mit Schmiermittel bei den hohen Belastungen garantieren. Allerdings kann keine optimale Schmierung aller Zahnflanken durch dieses Verfahren gewährleistet werden. Aus diesem Grund soll durch ein neues Design eine optimierte Schmierung durch integrierte, innenliegende Schmierkanäle erzielt werden. Dieses funktionsgerechte Design ist allerdings nicht mehr mit konventionellen Verfahren umsetzbar, weshalb auf additive Fertigungsverfahren, im Falle der Firma John Deere auf das LPBF, zurückgegriffen werden soll. Dabei bleibt die Umgebung des Sonnenrades, insbesondere die Verzahnung, unverändert.

Um einen wirtschaftlichen Vergleich zwischen konventionellen und additiven Prozessketten zu ermöglichen, wird angenommen, dass eine ähnliche Schmierwirkung durch die Erzeugung innenliegender Konturen durch konventionelle Bohrungen erzielt werden kann. In der Praxis ist eine zufriedenstellende Schmierwirkung auf dieser Weise allerdings nicht realisierbar, da die Geometrie der Schmierkanäle nicht frei wählbar ist. Mit Hilfe des Technologieketten-Planungstools, entwickelt im Rahmen des KitkAdd Projekts, werden die generierten Technologieketten bzgl. ihrer Eignung und ihres Potentials bewertet, indem vor allem die Herstellkosten und Produktionszeiten miteinander verglichen werden.

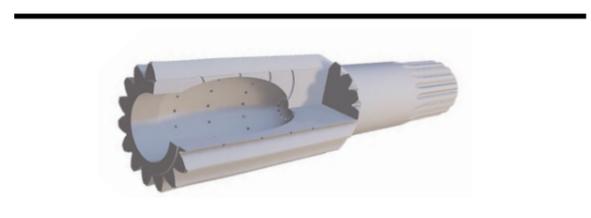
PRODUKTMODULARISIERUNG UND PROZESSKETTEN

Zu Beginn der Technologiekettenplanung ist das gewünschte Bauteil zu modularisieren. Im Falle des Sonnenrades werden fünf Module generiert (vgl. Abbildung 3.11). Der Wellenschaft (1) dient der Distanzüberbrückung zwischen Kraftein- und Kraftausleitung. Die Steckverbindung (2) wird über das Differentialgetriebe angetrieben. Die Spline (3) überträgt die Kraft auf die Bremsscheibe. Die Laufverzahnung (4) dient als Krafteinleitung ins Planetengetriebe und die Innenkontur (5) dient der Schmierung der Zahnflanken der Laufverzahnung. Die Innenkontur ist in nebenstehender Grafik in zwei Ausführungen aufgeführt. Bei der oberen Variante (5*) ist die Innenkontur nach Anwendung des Bohrens zu sehen. In der unteren Variante (5) ist das Ergebnis nach Anwendung des additiven Verfahrens zu erkennen.

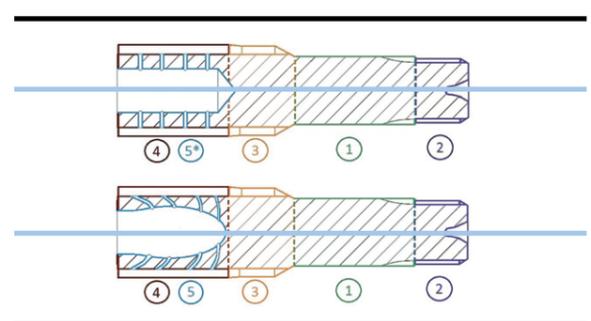
Potentielle Technologien zur Realisierung der oben genannten Bauteilmodule des Sonnenrades sind das Schmieden, Pressen, Drehen, Walzfräsen, Schleifen, Einsatzhärten und selektive Laserschmelzen. Zur Zuordnung der Technologien zu den entsprechenden Modulen, werden technische Parameter, wie z.B.

Abmessungen, Komplexität oder Oberflächenbeschaffenheit miteinander verglichen.

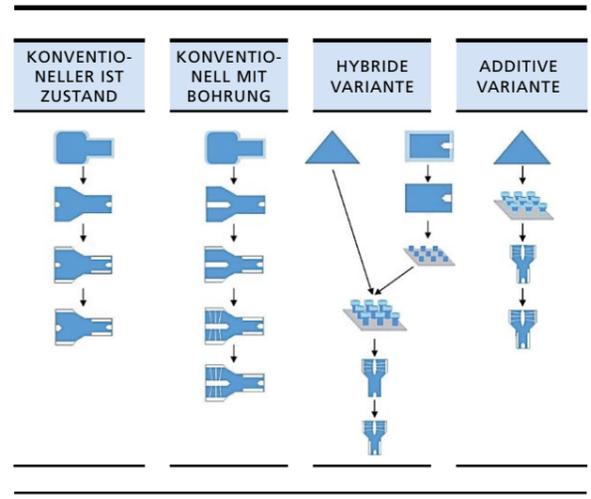
Entsprechend können unterschiedliche Technologieketten generiert werden. Die konventionelle Ist-Technologieketten startet mit der Anlieferung des Rohteils, das im Anschluss gedreht wird. Es folgt das Walzfräsen der Spline, Lauf- und Steckverzahnung. Bevor das Bauteil gehärtet wird, wird die Laufverzahnung noch geschliffen. Bei der konventionellen Auslegung wird vor dem Schleifen und Härten die Innenkontur gebohrt (vgl. Abbildung 3.12).



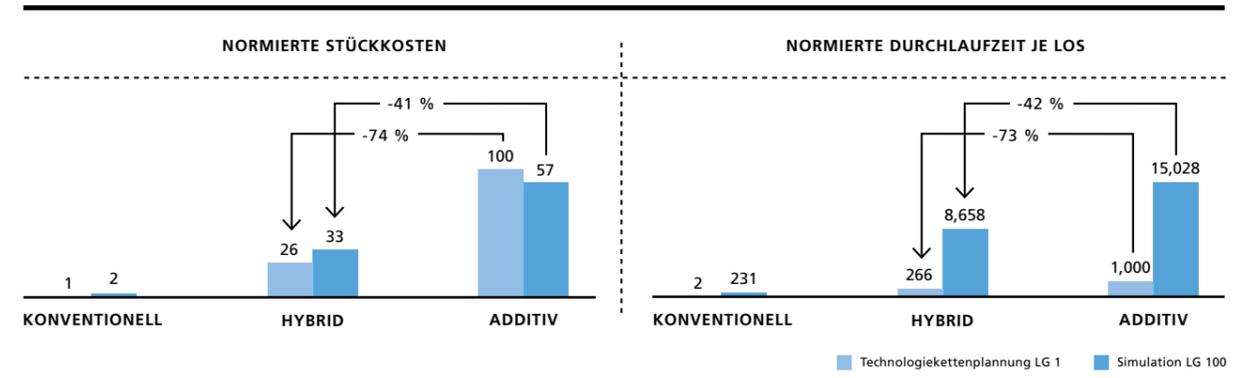
3.10 SONNENRAD MIT INNENLIEGENDEN ÖLKANÄLEN



3.11 MODULARISIERTES SONNENRAD



3.12 BETRACHTETE TECHNOLOGIEKETTEN BEI JOHN DEERE



3.13 VERGLEICH DER DURCHLAUFZEITEN UND STÜCKKOSTEN UNTERSCHIEDLICHER TECHNOLOGIEKETTEN

Bei der hybriden Technologieketten werden die Steckverzahnung, der Wellenschaft und die Spline zuerst gedreht. Die Laufverzahnung und Innenkontur werden mit der additiven Technologie LPBF realisiert. Danach werden die Lauf- und Steckverzahnung walzgefräst und die Laufverzahnung geschliffen. Zuletzt, wie bei der konventionellen Variante, erfolgt das Härten des Bauteils. In der additiven Technologieketten werden die Bauteile zuerst per LPBF realisiert. Im Anschluss wird das Walzfräsen für die Lauf- und Steckverzahnung sowie die Spline durchgeführt. Nachdem die Laufverzahnung geschliffen wurde, erfolgt das Härten.

BEWERTUNG UND OPTIMIERUNG DER FERTIGUNGSAKTIVITÄTEN

In der folgenden Abbildung werden die normierten Stückkosten und Durchlaufzeiten für alle Technologieketten dargestellt. Dabei werden sowohl die manuell erstellten Ablaufsimulationen als auch die Ergebnisse des Bewertungstools herangezogen. Es konnte eindeutig aufgezeigt werden, dass rein konventionelle Technologieketten die geringsten Herstellkosten und -zeiten aufweisen, da nur etablierte und kostengünstige konventionelle Fertigungsverfahren verwendet werden. Werden alle Module rein additiv mit LBPF gefertigt, dann sind die Fertigungskosten um ein vielfaches höher und benötigen deutlich mehr Zeit als konventionelle Technologieketten. In der hybriden Technologieketten wird die Laufverzahnung mit der innenliegenden Schmierkontur mittels LPBF-Verfahren hergestellt, die vier weiteren Module werden konventionell hergestellt. Hierbei wird deutlich, dass die Durchlaufzeiten deutlich schneller sind als bei der additiven Fertigung. Auch die Fertigungskosten sinken je nach Losgröße um 41-74 %, falls anstatt der rein additiven Alternative die hybride Fertigungsalternative gewählt wird.

Bei dem Vergleich der Simulationsergebnisse und den Daten des Technologiekettenplanungstools wird deutlich, dass diese dieselbe Rangfolge an Fertigungsalternativen ergeben. Aufgrund des unterschiedlichen Bewertungsumfangs und der verschiedenen Losgrößen unterscheiden sich die Daten. Der Aufwand zur Erstellung derartiger Simulationen spricht hierbei gegen eine Verwendung zur Generierung von Planungsalternativen im Rahmen der Vorentwicklung. Mit Hilfe des Technologiekettenplanungstools konnten automatisiert 65 Technologieketten generiert werden. Davon sind 33 Technologieketten aus rein konventionellen Technologien zusammengesetzt, die oben bereits erläutert wurden. Aus diesen Ergebnis lässt sich ableiten, dass die additive Technologieketten derzeit noch keine attraktive Variante aufgrund der hohen Fertigungszeit und

-kosten darstellt. Mit der Realisierung der hybriden Fertigung kann die Funktionserfüllung sichergestellt und eine wirtschaftlichere Fertigung ermöglicht werden. Im Falle des Sonnenrades konnte gezeigt werden, dass die hybride Technologieketten die Durchlaufzeit und Herstellungskosten im Vergleich zur additiven Technologieketten erheblich gesenkt werden. Die konventionelle Herstellung gewährleistet nicht die 100 %-ige Funktionserfüllung aufgrund der nicht frei wählbaren innenliegenden Schmierkanäle. Dennoch ist diese Technologieketten derzeit die wirtschaftlichste Alternative.

OPTIMIERUNG PRODUKT- UND PRODUKTIONSBEZOGENER FREIHEITSGRADE

Wird eine Modifikation der Produktanforderungen durchgeführt, können bislang verworfene Technologien bei der Produktion berücksichtigt werden. Die Spline-Verzahnung hat mechanische Eigenschaften, wie z.B. eine Bruchdehnung mit A=16 %, eine Härte mit 15 HRC und eine Streckgrenze mit Re=550 N/mm². Zu Beginn wird zur Herstellung der Spline-Verzahnung die Technologie Pressen verworfen. Werden die Parameter allerdings angepasst, in diesem Fall mit A=15 % und Re=500 N/mm², wird in der darauffolgenden Optimierung iteration die Technologie Pressen mitberücksichtigt. Die gewünschte Härte von 15 HRC wird dann nur mit dem Verfahren Einsatzhärten realisiert. Die Spline-Verzahnung ist somit mit den Technologien Pressen und Härten umzusetzen und wirtschaftlicher als zuvor. Das Anpassen der Härte ist allerdings kritisch zu betrachten, denn nach wie vor steht die technische Funktionserfüllung im Mittelpunkt.

FAZIT

Am Beispiel des Sonnenrades konnte mittels der Simulationsergebnisse und des Technologiekettenplanungstool gezeigt werden, dass die hybrid additive Fertigung deutlich wirtschaftlicher ist als eine rein additive Fertigung. Darüber hinaus bietet das Technologiekettenplanungstool die Möglichkeit automatisierte Produkt- und Technologieanpassungen vorzuschlagen und zu bewerten, was für die zukünftige Planung des Einsatzes neuer Fertigungs- und Produkttechnologien von Bedeutung ist.



**PROJEKT-ANSPRECHPARTNER
BEI JOHN DEERE**
PHILIPP SURREY
ADVANCED MANUFACTURING ENGINEER
SURREYPHILIPP@JOHNDEERE.COM

FALLBEISPIEL EISENHUTH: HYBRIDGEFERTIGTE SPRITZGUSSWERKZEUGE

Im Zusatz zu den anderen teilnehmenden Industriepartnern des KitkAdd-Projekts hat sich die Firma Eisenhuth auf hybride Produktionsketten im Werkzeugbau und Kleinserien fokussiert. Hier soll das additive Fertigungsverfahren zur Produktion des Werkzeugs und die entsprechend nachfolgende Kleinserienfertigung begutachtet werden. Ziel ist es zu überprüfen, wie hoch der Einfluss der optimierten Zykluszeiten durch die mittels des selektiven Laserschmelzens (LPBF) gefertigten Formeinsätze auf die Spritzgussteilkosten ist.

Das Werkzeug, das den Kunststoff formt, setzt sich aus den Modulteilen Formbasis und Formeinsätze zusammen. An die Formbasis können einzelne Module, wie z.B. Formeinsätze und Auswerfer, zur Vervollständigung des Werkzeugs angebracht werden. Aufgrund der Getaltanpassung der Formeinsätze können diese mittlerweile nur noch additiv gefertigt werden. Die Bauteilkomplexität ist aufgrund der Realisierung der konturnahen Kühlkanäle angestiegen.

BEWERTUNG DER WERKZEUGALTERNATIVEN

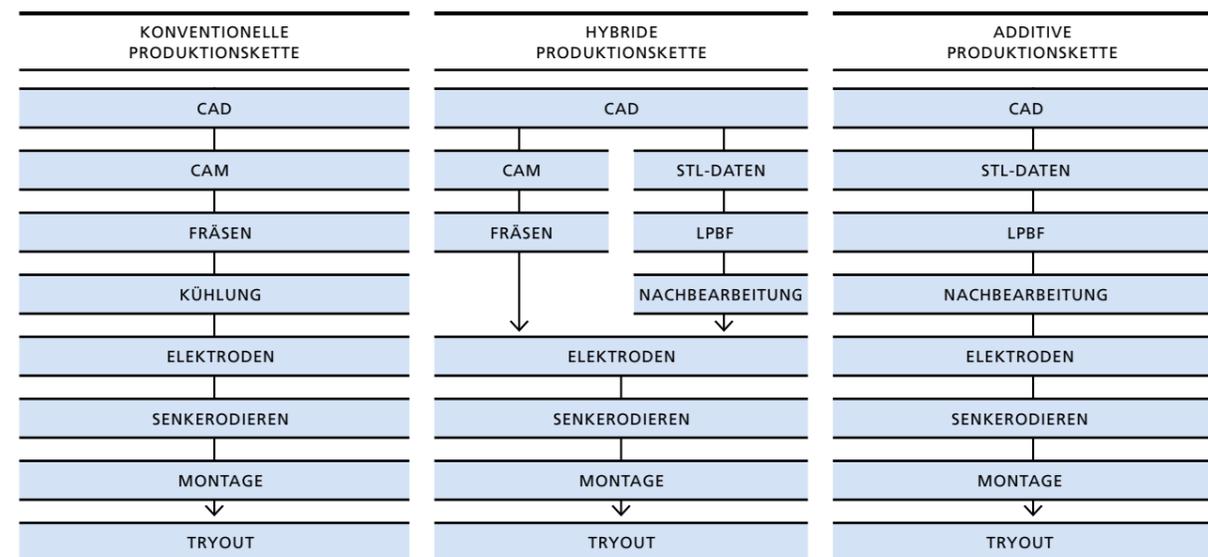
Für die Ermittlung der Kosten und Zeit in der Produktion, wurde ein Berechnungstool für die Firma Eisenhuth entwickelt. Eingangsdaten können jederzeit abgeändert werden und somit deren Einfluss auf die Ausgangsdaten gezeigt werden.

Die Basis des Berechnungstools stellt die Aufstellung der verschiedenen Produktionsketten dar. Von diesen können sämtliche Daten und Parameter abgeleitet werden, die die Werkzeug- und Spritzgussteilkosten sowie Produktionszeiten beeinflussen. Es gibt drei mögliche Produktionsketten: Die konventionelle, die hybride und die additive Produktionskette. Wie in Abbildung 3.14 zu erkennen ist, weisen alle drei Herstellalternativen des Spritzgusswerkzeugs einen sehr ähnlichen Ablauf auf. Dennoch werden nur bei der hybriden Produktionskette einige Arbeitsschritte parallel durchgeführt.

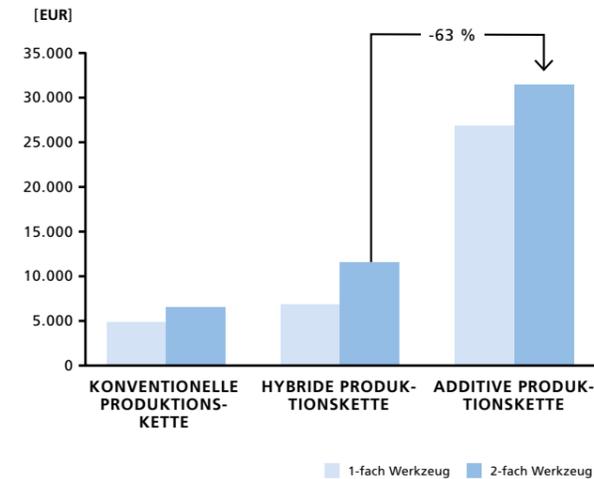
Nach der Aufstellung der Produktionsketten sind die Werkzeugkosten für die zwei Varianten, dem 1-fach und dem 2-fach Werkzeug, zu ermitteln (vgl. Abbildung 3.15). Hierbei ist auffällig, dass die hybriden Werkzeugkosten ca. 63 % geringer als die additiven Werkzeugkosten für das 2-fach Werkzeug sind. Der Grund ist, dass die Formbasis in der konventionellen und hybriden Produktionskette konventionell hergestellt wird. Bei der additiven Produktionskette wird davon ausgegangen, dass die Formbasis additiv gefertigt wird und die Kosten in die Höhe treibt.

BEWERTUNG DER VERWENDUNG UNTERSCHIEDLICH GEFERTIGTER WERKZEUGE IN DER ENDPRODUKTHERSTELLUNG

Nach der Ermittlung der Werkzeugkosten sind die Spritzgussteilkosten für die zwei Werkzeugvarianten sowie den drei Produktionsketten zu bestimmen (vgl. Abbildung 3.16). Bei der Auswahl des Kostenmodells werden nicht nur die reinen Kosten für die



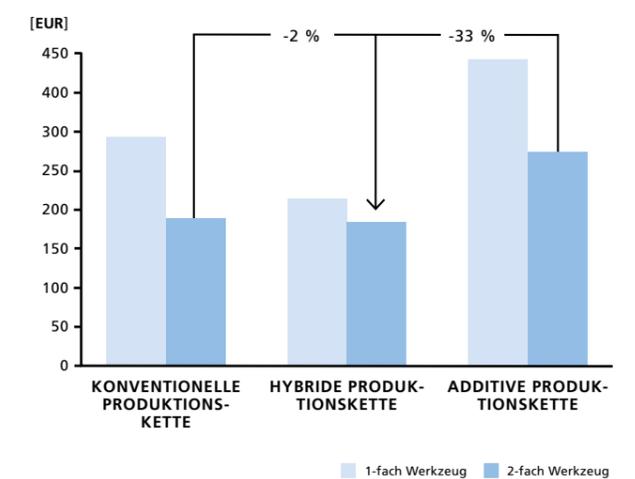
3.14 HERSTELLUNGALTERNATIVEN FÜR DAS SPRITZGUSSWERKZEUG



3.15 BESTIMMUNG DER WERKZEUGKOSTEN

Formbasis oder Formeinsätze berücksichtigt, sondern alle Kostenpunkte, wie bspw. der Einflussfaktor Zykluszeit. Bei additiv gefertigten Formeinsätzen ist diese aufgrund der konturnahen Kühlung niedriger als bei konventionell gefertigten Formeinsätzen, es kann eine Zeitverkürzung von 40 Sekunden auf 22 Sekunden gemessen werden. Diese Kenntnis sowie die unterschiedliche Anzahl an Kavitäten bei den Werkzeugvarianten führen zu unterschiedlichen Maschinenkapazitäten. Für 100.000 Bauteile sind die Stückkosten der Produktionskette des hybrid gefertigten Werkzeuges um 32,7 % günstiger als die Stückkosten mit dem additiv gefertigten Werkzeug und ca. 2,5 % günstiger als die Stückkosten der Produktionskette mit dem konventionell gefertigten Werkzeug. Die höheren Kosten der additiven Produktionskette lassen sich mit der Zeit- und Kostenintensiveren additiven Fertigung der Formbasis begründen.

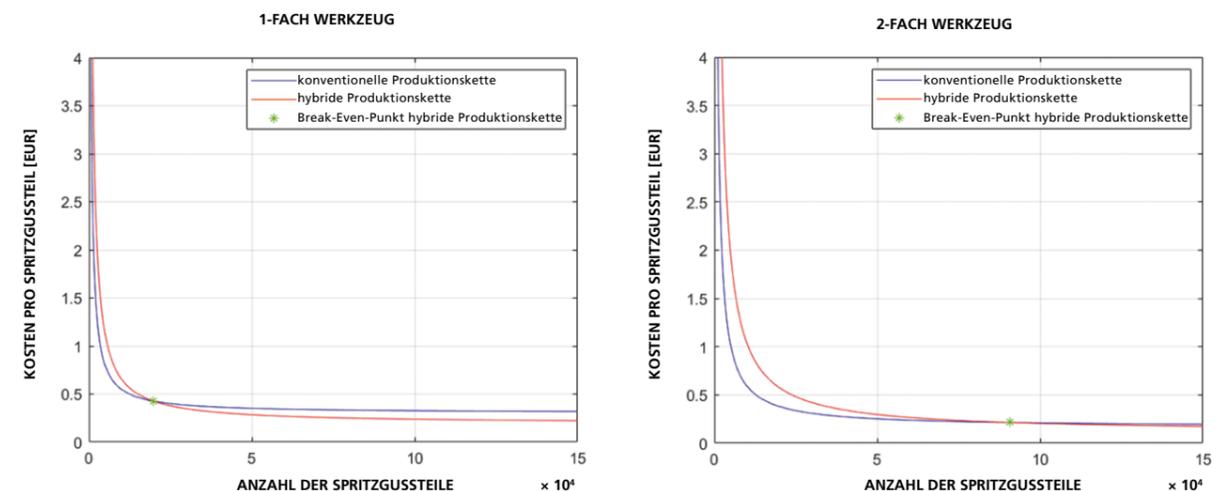
Für einen wirtschaftlichen Vergleich ist im Rahmen der Break-Even-Analyse der Break-Even-Punkt für die Anzahl der Spritzgussteile zu bestimmen, um eine Aussage über den Nutzen des Einsatzes von



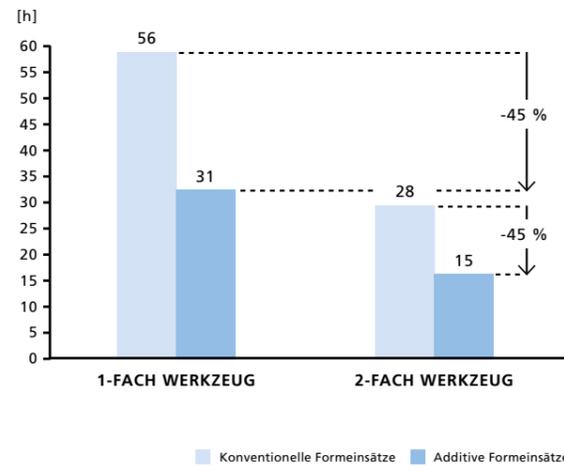
3.16 BESTIMMUNG DER SPRITZGUSSTEILKOSTEN BEI 100.000 TEILEN

per selektiven Laserschmelzen gefertigten Formeinsätzen treffen zu können. Es gilt zu bestimmen, ab welcher Produktionsmenge Spritzgussteile sich größere Investitionskosten für die additiven Formeinsätze aufgrund der geringeren Zykluszeiten rentieren. Bei den hybrid gefertigten Werkzeugen liegt der Break-Even-Punkt bei 19.728 Teilen (1-fach) bzw. bei 90.728 Teilen (2-fach). Für die konventionelle und additive Produktionskette konnte kein Break-Even-Punkt werden (vgl. Abbildung 3.17).

Liegt die produzierte Stückzahl oberhalb des Break-Even-Punkts, ist die hybride Produktionskette aufgrund der niedrigeren Kosten pro Spritzgussteil sowie der geringeren Produktionszeit pro Spritzgussteil vorzuziehen. Liegt die Stückzahl allerdings unterhalb des Break-Even-Punkts, ist zwischen dem Kosten- und Zeitfaktor abzuwägen. Aus Abbildung 3.18 kann entnommen werden, dass bei 5.000 Teilen additiv gefertigte Formeinsätze eine Zeiteinsparung von 45 % versprechen.



3.17 BESTIMMUNG DES BREAK-EVEN-PUNKTS FÜR DAS HYBRID GEFERTIGTE WERKZEUG

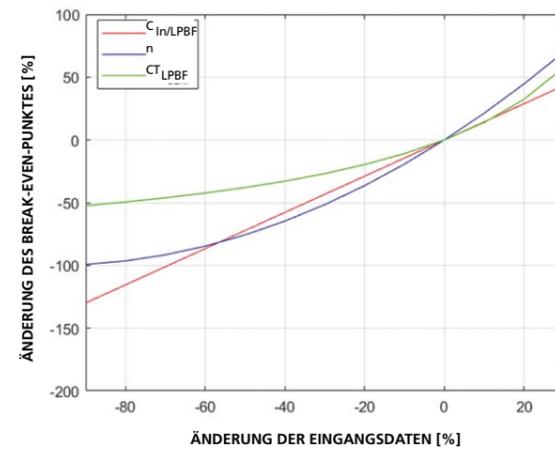


3.18 PRODUKTIONSZEIT VON 5.000 TEILEN FÜR GEFERTIGTE FORMEINSÄTZE

SENSITIVITÄTSANALYSE

Mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse werden die Einflussgrößen auf vorhandene Break-Even-Punkte im Berechnungstool automatisiert ermittelt (vgl. Abbildung 3.19). Um den Einfluss der Variablen festzustellen, wird für jede Variable einzeln der neue Break-Even-Punkt bestimmt. Anschließend wird die prozentuale Änderung des Break-Even-Punkts ermittelt. Vor allem die Parameter Anzahl der Formeinsätze (n), Zykluszeiten des konventionellen und additiven Formeinsatzes (CT_{kon} und CT_{LPBF}) sowie die additiven Formeinsatzkosten ($C_{IN/LPBF}$) haben den größten Einfluss auf den Break-Even-Punkt. Zur Veranschaulichung werden die Einflussfaktoren graphisch dargestellt. Es ist zu erkennen, dass ein Senken eines der drei Faktoren jeweils auch den Break-Even-Punkt sinken lässt. Den kleinsten Einfluss hat die Zykluszeit CT_{LPBF} ; hingegen haben die Formeinsatzkosten $C_{IN/LPBF}$ für kleinere prozentuale Anteile den größten Einfluss auf den Break-Even-Punkt.

Formeinsätze können aufgrund der Implementierung von konturnahen Kühlkanälen nicht mehr konventionell hergestellt werden. Daher wird auf additive Fertigungsverfahren, wie das selektive Laserschmelzen, zurückgegriffen. Die Formbasis kann allerdings mit konventionellen Fertigungsverfahren realisiert werden. Aus diesem Grund sind hybride oder additive Produktionsketten mögliche Lösungen für die Werkzeugherstellung. Diese Vorgehensweise, ins-



3.19 DARSTELLUNG DER EINFLUSSFAKTOREN

besondere die Auslegung einer parallel verlaufenden konturnahen Kühlung führt zu deutlich verkürzten Bauteilzeiten und einer verbesserten Teilequalität.

ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Mit Hilfe der Break-Even-Analyse des Berechnungstools konnte gezeigt werden, dass die Produktionskette mit hybridem Werkzeug bei 19.728 Teilen (1-fach) bzw. bei 90.728 Teilen (2-fach) zu wählen ist. Diese Produktionskette ist um 32,7 % günstiger als die des rein additiv gefertigten Werkzeugs, da hier die Formbasis konventionell und nicht additiv gefertigt wurde. Bei geringerer Stückzahl ist zwischen Kosten und Zeit abzuwägen. Eine rein additive Produktionskette nimmt eine geringere Zeit in Anspruch als eine hybride und führt zu einer Zeiteinsparung von 45 %. Nach Ergebnissen des Berechnungstools ist derzeit somit die hybride Produktionskette der additiven vorzuziehen. Diese Vorgehensweise, insbesondere die Auslegung einer parallel verlaufenden konturnahen Kühlung führt zu deutlich verkürzten Bauteilzeiten und einer verbesserten Teilequalität.



3.20 DARSTELLUNG DES 2-FACH WERKZEUGS MIT KONTURNAHER KÜHLUNG



**PROJEKT-ANSPRECHPARTNER
BEI EISENHUTH GMBH & CO.KG**
THORSTEN HICKMANN
GESCHÄFTSFÜHRER
T.HICKMANN@EISENHUTH.DE

AUTOR: NICLAS ESCHNER

AUFBAU EINER VERSUCHSANLAGE FÜR AKUSTISCHE IN-LINE-ÜBERWACHUNG VON LPBF

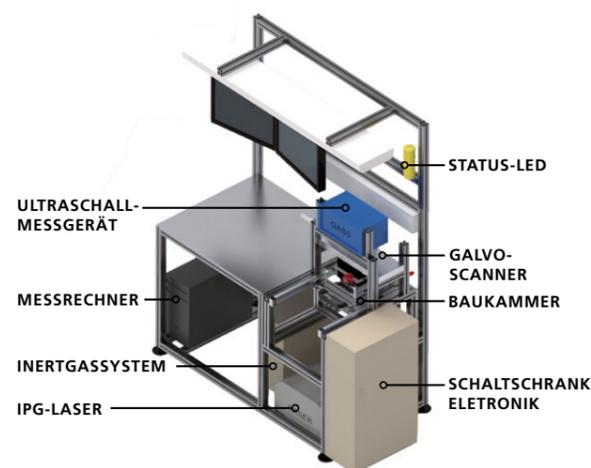
Um verschiedene Messtechniken für das LPBF untersuchen zu können, wurde eine Versuchsumgebung geschaffen. Diese erlaubt eine freie Variation der prozessbestimmenden Parameter und eine einfache Integration verschiedener Sensoren.

GRUNDAUFBAU

Zentrales Element des Aufbaus ist die eigens entwickelte Prozesskammer, die im Abschnitt weiter unten detaillierter vorgestellt wird. Über dieser Prozesskammer ist ein Galvoscanner angeordnet, der den Laserstrahl des 250 Watt IPG-Lasers in die Prozesszone abbildet. Die von Cambridge Technology verwendete SMC-Scannerkarte kann über bereitgestellte XML-API flexibel angesprochen werden und erlaubt eine Anpassung aller Belichtungsparameter. Als Inertgas System wird ein System der Firma ULT eingesetzt, das eine freie Regelung des Volumenstromes erlaubt. Die zentrale Steuerung der Anlage und aller Komponenten übernimmt ein eigens entwickeltes LabVIEW-Programm. Hierüber kann eine Synchronisation der Messtechnik mit dem eigentlichen Prozess erfolgen. Die beschriebenen Anlagenkomponenten sind in einen Maschinenrahmen aus Standardprofilen integriert. Um einen einfachen Zugang zur Prozesskammer zu haben, ist diese auf Rollen gelagert und kann nach vorne unter der Lasereinheit herausgezogen werden. So können einfach und schnell Änderungen zur Sensorintegration vorgenommen werden, ohne dass eine Demontage des gesamten Systems notwendig ist. Für ein angenehmes und sicheres Arbeiten an der Versuchsanlage wurden entsprechende Sicherheitskonzepte (Sicherheitsschalter, Laserklasse 1, usw.) sowie Ergonomie Konzept (zusätzliche Ausleuchtung, höhenverstellbare Monitore, usw.) umgesetzt (vgl. Abbildung 4.1 und 4.2).



4.1 FOTO DES REALISIERTEN VERSUCHSANLAGE



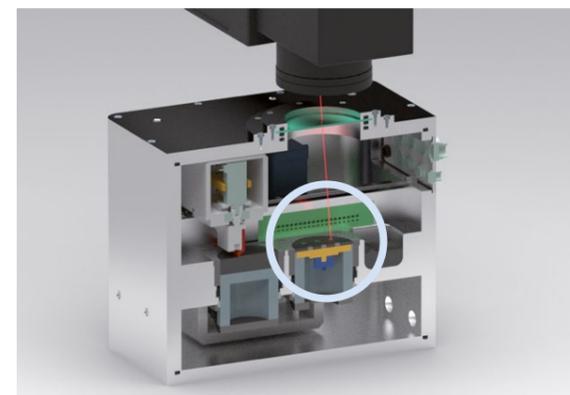
4.2 SCHEMATISCHER AUFBAU DER VERSUCHSANLAGE

PROZESSKAMMER

Abbildung 4.3 zeigt einen Querschnitt durch die Prozesskammer. Der Mechanismus zum Auftragen des Pulvers ist ein einfacher Wischermechanismus. Der Wischer bewegt sich von links nach rechts und trägt das Pulver aus dem Pulverbehälter auf die Bauplattform auf. Als Beschichterklappe wird eine metallverstärkte Kunststoffklappe verwendet. Die Bauplattform (gelb) bewegt sich nach jeder Belichtung um eine Schichtdicke nach unten (20-50µm) und der Prozess des Pulverauftrags beginnt von vorne. Alle Achsen werden mit Schrittmotoren bewegt. In Summe besteht das System aus vier Achsen. Direkt neben der Bauplattform sind Aus- und Einlässe (grün) für den Inertgasstrom integriert. Die Auslässe und Einlässe sind aus 3D gedrucktem Kunststoff lassen sich leicht austauschen, um den Inertgasstrom zu optimieren. Das gesamte System ist gegen die Umgebung abgedichtet, um die Inertgas Atmosphäre zu gewährleisten und leichte Über- bzw. Unterdrücke erzeugen zu können. Auf der Oberseite der Prozesskammer ist ein Laserdurchgangsglas eingefasst durch das die Prozesszone belichtet werden kann.

INTEGRIERTE SENSORIK

Aktuelle Anlagenhersteller setzen auf optische Methoden zur Prozessüberwachung. So werden beispielsweise Dioden zur Überwachung der Schmelzbadintensität im Infrarot Bereich oder Kameras zu der Aufzeichnung der Schmelzbadkontur eingesetzt. Prinzip bedingt haben diese Methoden Nachteile, wenn es um die Detektion innenliegender Defekte, wie Risse oder Poren geht. Im Rahmen dieses Projektes wurde daher eine akustische Prozessüberwachung entwickelt. Dabei werden die prozessimmanenten Signale aufgezeich-



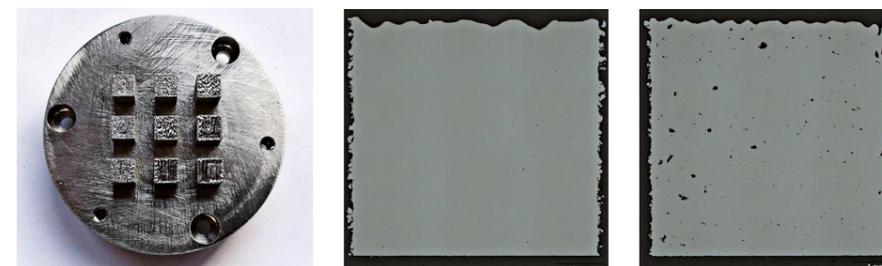
4.3 QUERSCHNITT DER PROZESSKAMMER

net und ausgewertet. Der Ansatz wurde bereits im Laserschweißen erprobt. Die akustischen Signale werden in Laserprozessen durch von Druckgradienten im Plasma oder Temperaturgradienten im Material ausgelöst, aber auch das Entstehen von Rissen verursacht charakteristische akustische Signale.

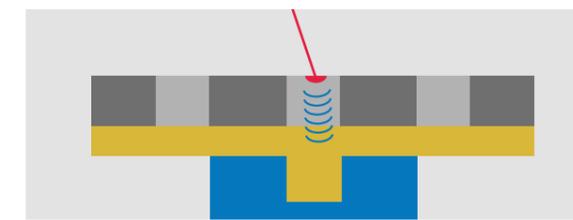
Um im Rahmen dieses Projektes zu überprüfen, ob die akustischen Signale geeignet sind, prozessrelevante Defekte zu erkennen, wurde ein akustischer Sensor nahe der Prozesszone in den Versuchsaufbau integriert. Systematisch skizziert ist dies in Abbildung 4.4. Rot dargestellt ist der Laser bzw. das Schmelzbad, von dem akustische Signale ausgehen und sich durch das Bauteil (in der Abbildung grau dargestellt) ausbreiten. Diese akustischen Signale werden an die Bauplattform (gelb) übertragen und können mit einem akustischen Sensor (blau) aufgezeichnet werden. Als Sensor wurde ein piezoelektrischer Sensor und Auswerteeinheit der Firma Qass verwendet. Mit diesem System können Frequenzen bis 50 MHz (Abtastrate 100 MHz) erfasst werden. Voruntersuchungen zeigten allerdings, dass prozessrelevante Signale lediglich bis 1 MHz zu beobachten sind. Mit dem beschriebenen Versuchsaufbau ist es möglich, akustische Signale in einem LPBF-Prozess aufzuzeichnen. Im folgenden Abschnitt soll gezeigt werden, wie der Ansatz systematisch auf seine Leistungsfähigkeit zur Detektion von Poren überprüft wurde.

AUSWERTUNG AKUSTISCHER PROZESS-SIGNALE MIT KÜNSTLICHER INTELLIGENZ

Im Rahmen dieses Projektes wurde untersucht, ob es anhand der akustischen Prozesssignale möglich ist, den LPBF Prozess hinsicht-



4.5 SUBSTRATPLATTE MIT 3 x 3 WÜRFELMATRIX UND UNTERSCHIEDLICHEN MASCHINENPARAMETERN



4.4 SENSORINTEGRATION NAHE DER PROZESSZONE

lich der erreichten Bauteilqualität zu überwachen. Als Maß für die Bauteilqualität wird vereinfacht die Bauteildichte herangezogen. Um die akustischen Signale mit den ermittelten Bauteildichten zu verknüpfen, wird eine künstliche Intelligenz trainiert.

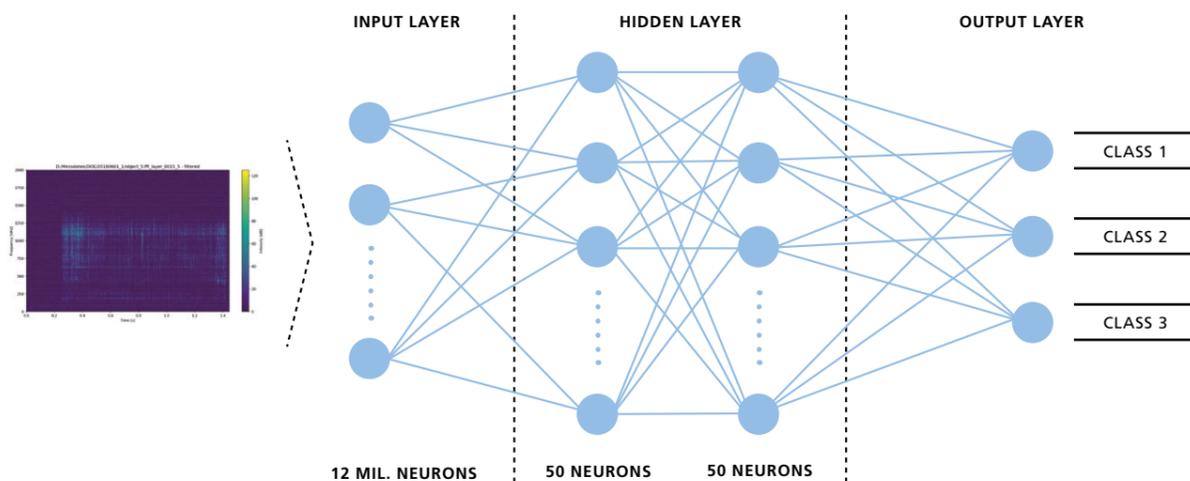
VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Um das akustische Messsystem in einem ersten Schritt zu bewerten, werden Referenzkörper mit unterschiedlicher Bauteilqualität (unterschiedlicher Dichte) aufgebaut und das dazugehörige akustische Signal erfasst.

Um systematisch Bauteile verschiedener Qualitäten zu erhalten, wurde ein Design of Experiments (DoE) mit drei Parametern (Laserleistung, Belichtungsgeschwindigkeit und Schraffurabstand) durchgeführt, die den Prozess maßgeblich beeinflussen. Die aus dem erstellten Versuchsplan resultierenden 18 Parametersätze werden als Würfel mit einer Kantenlänge von 5 mm aufgebaut. Das verwendete Material ist der Edelstahl 316 L. Jeder Baujob enthält neun verschiedene würfelförmige Referenzkörper, wie in Abbildung 4.5 dargestellt. Diese werden in einer 3 x 3-Matrix auf die Bauplattform aufgebaut. In Summe ergeben sich insgesamt zwei Substratplatten. Abbildung 4.5 verdeutlicht mit zwei exemplarischen Schlißbildern, dass mit diesem Vorgehen erfolgreich Würfel mit unterschiedlicher Dichte bzw. Bauteilqualität aufgebaut werden konnten. Mit dem gewählten Parametersätzen konnten sowohl Gasporen (kleine, runde Poren) als auch Fusionsporen (gezogene, größere Poren) erzeugt werden.

REFERENZMESSUNG

Beim Aufbauprozess wird zu jeder Schicht eines jeden Würfels ein akustisches Signal aufgezeichnet. Jeder Schicht muss für das Training ein sogenannte Label, also eine Referenz zugeordnet werden, die



4.6 MASCHINELLES LERNEN ZUR PORENDETEKTION IM LPBF-PROZESS AUF BASIS AKUSTISCHER MESSSIGNALE

deren Qualität angibt. Da die Dichte jedoch nur mit sehr hohem Aufwand individuell für jede Schicht bestimmt werden kann, wird vereinfacht jeder Schicht eines Würfels dieselbe Dichte zugeordnet. Die Dichte wurde mit Hilfe von Schliffbildern und archimedischer Dichtemessung ermittelt. Je nach erreichter Dichte werden die Würfel in drei Dichteklassen eingeteilt (geringe Dichte, mittlere Dichte, hohe Dichte).

DATENVORBEREITUNG

Die aufgezeichneten akustischen Signale müssen über eine Merkmalsextraktion für das maschinelle Lernen in einen handhabbaren Eingangsvektor überführt werden. Hierzu wurden verschiedene, für die akustische Datenverarbeitung typische, Merkmalsextraktionen versucht. So können aus den akustischen Rohsignalen statistische Merkmale (Mittelwert, Obergrenze, Varianz, ...) erzeugt werden oder andere komplexere Merkmalsextraktionen wie Wavlet oder Fourier-extraktionen durchgeführt werden. Vielversprechend zeigte sich im Rahmen dieses Projektes die STFT (Short-Time-Fourier-Transformation) an deren Ende ein sogenanntes Wasserfalldiagramm oder Spektrogramm steht, wie es in Abbildung 4.6 auf der linken Seite der Darstellung zu sehen ist.

DER KI-ALGORITHMUS

Jeder Würfel hat 120 Schichten was zu einem Gesamtdatensatz von 2160 Einzeldatensätzen führt, die für das Anlernen des KI-Algorithmus zur Verfügung stehen.

Als Algorithmus zum Verknüpfen des Eingangs- (akustisches Signal) und des Ausgangsvektors (Klasse der Dichte) wird ein künstliches neuronales Netz verwendet. Künstliche neuronale Netze sind an die Funktionsweise des menschlichen Gehirns angelehnt und können komplexe Zusammenhänge lernen. Dabei werden die Parameter der Neuronen so lange angepasst und optimiert, bis sie den gesuchten Zusammenhang abbilden. Hierfür ist eine Vielzahl an Trainings notwendig, die auf einem speziell dafür ausgestatteten Computer

(Nvidia DGX-Station) durchgeführt werden. Bei der Implementierung der Algorithmen kann auf existierende Bibliotheken in Python (sklearn Package und Google TensorFlow) zurückgegriffen werden.

Um beim Training zu verhindern, dass die einzelnen akustischen Muster vom Algorithmus auswendig gelernt werden, wird ein Teil der Daten erst nach abgeschlossenerem Training an den Algorithmus übergeben. Hierbei spricht man von so genannten Over-Fitting bzw. der Cross-Validierung um dieses zu verhindern.

Der generelle Aufbau des neuronalen Netzes mit seinen Neuronen (grün) ist in Abbildung 4.6 zu sehen. Es handelt sich um Netz mit zwei verdeckten Schichten. Der direkt aus dem Spektrogramm resultierende Vektor enthält 12 Millionen Werte und stellt den Inputvektor dar. Um diese Anzahl der Neuronen in der ersten verdeckten Schicht zu reduzieren, wird ein Bottleneck-Ansatz (dt. Flaschenhalsansatz) verwendet. Dabei wird eine Vielzahl an Eingangsvektoren in der ersten verdeckten Schicht auf in diesem Fall 50 Neuronen gebracht.

ERGEBNISSE

Mit dem beschriebenen Ansatz können akustische Daten erfolgreich einer Dichteklasse zugeordnet werden. Dabei liegt der trainierte Algorithmus in 95% aller Klassifikationen richtig. Im Rahmen dieses Projektes konnte das Potential akustischer Messtechnik für den LPBF Prozess verdeutlicht werden.

Im Rahmen zukünftiger Untersuchungen muss der Ansatz für komplexere Geometrien weiter erprobt werden. Weiterhin ist die Erkennung einzelner Poren mit diesem Ansatz anzustreben.



**PROJEKT-ANSPRECHPARTNER
BEIM WBK INSTITUT FÜR
PRODUKTIONSTECHNIK**
NICLAS ESCHNER
WISSENSCHAFTLICHER MITARBEITER
NICLAS.ESCHNER@KIT.EDU

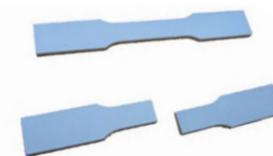
AUTOR: MARKUS HOFFMANN

FALLBEISPIEL H&H: SCHWEIßEN VON LPBF-BAUTEILEN

Eine Prozesskette zur Herstellung von LPBF-Bauteilen stellt die Kombination von LPBF-Fertigung und dem Laserschweißprozess dar. Da der Bauraum von LPBF-Anlagen begrenzt ist, im Fall der im Hause H&H genutzten SLM 280", da Eigenname des Maschinenherstellers 280 x 280 x 345 mm, stellt das Aufteilen eines Bauteils in mehrere Einzelteile und dem anschließenden Fügen einen Weg zur Herstellung größerer Bauteile dar. Um Schweißverbindungen in LPBF-Bauteilen näher zu charakterisieren, wurden Flachzugproben aus AlSi10Mg verwendet. Diese wurden als geteilte Proben hergestellt (vgl. Abbildung 4.7) und anschließend per Laserschweißverfahren gefügt. Um einen Vergleich zum reinem Substrat herzustellen, wurden des Weiteren ungeteilte Flachzugproben hergestellt und geprüft. Zur Charakterisierung der Schweißverbindungen wurden Spannungs-Dehnungs-Diagramme sowie Bruchbildaufnahmen herangezogen.

FESTIGKEITSUNTERSUCHUNG AN SCHWEISSPROBEN AUS ALSI10MG

Die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe (siehe Abbildung 4.8, blaue Graphen) zeigen ein frühzeitiges Versagen im elastischen Bereich. Die Untersuchung der Bruchbilder zeigte Flächen im mittleren Bereich der Probe, die nicht verschweißt wurden (siehe Abbildung 4.9). Aufgrund des tatsächlich geringeren Spannungsquerschnitts wird die wirkende Spannung zu niedrig angegeben, womit das frühzeitige Versagen erklärt werden kann.



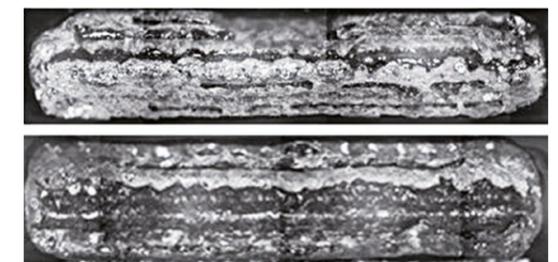
4.7 DARSTELLUNG DER PROBEN FÜR FÜGEVERSUCHE

In einem nächsten Schritt wurde die Kontaktfläche der Proben mittels beidseitiger Fasen so angepasst, dass der zu durchschweißende Querschnitt verringert wird. Durch diese Maßnahme konnte das Schweißergebnis verbessert werden, jedoch zeigte sich keine wesentliche Festigkeitssteigerung (vgl. Abbildung 4.8, Graph 2.1 – 2.4). Lediglich die Bruchdehnung konnte positiv beeinflusst werden. Die Bruchbilder deuteten weiterhin auf eine nicht durchgehende Schweißverbindung hin (vgl. Abbildung 4.10, dunkle Bereiche). Der Grad der Ausbildung der dunklen Bereiche korreliert dabei mit der Bruchdehnung. Je stärker diese ausgeprägt sind, desto früher ist ein Bruch der Probe zu beobachten.

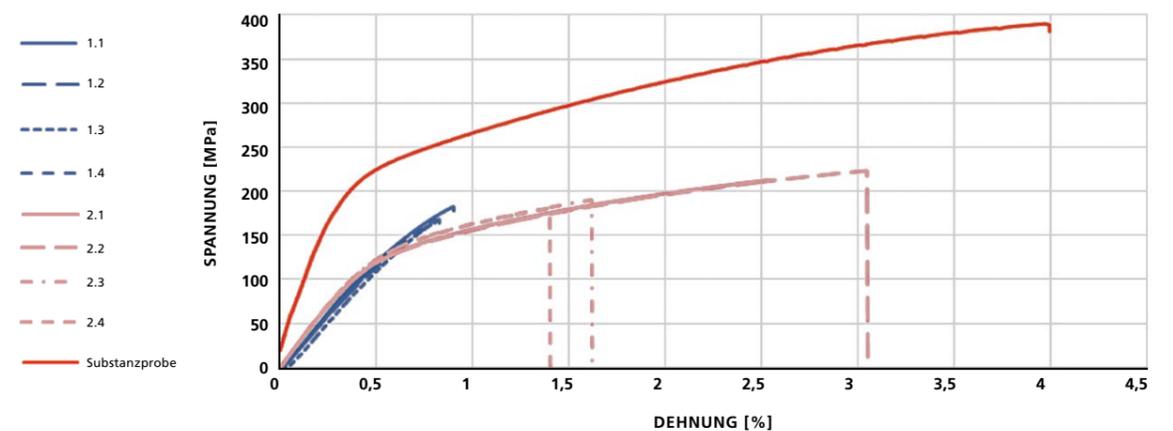
Bei genauerer Betrachtung der Bruchflächen zeigte sich des Weiteren eine vermehrte Porenbildung, die zu einer Schwächung der



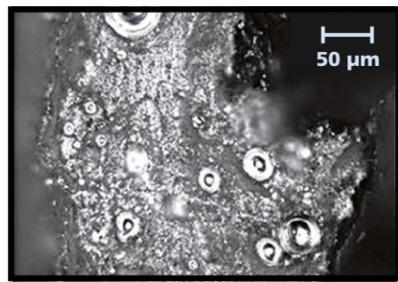
4.9 BRUCHBILD PROBE 1.2



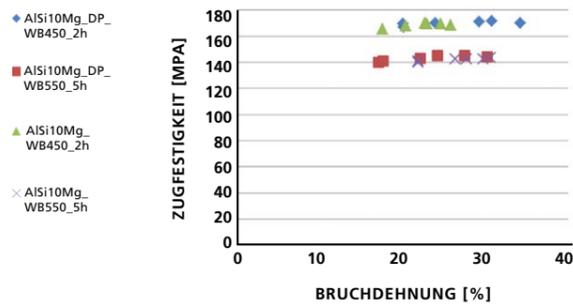
4.10 BRUCHBILDER DER ZUGPROBEN
(OBEN PROBE 2.2, UNTEN PROBE 2.4)



4.8 SPANNUNGS-DEHNUNGS-DIAGRAMM DER SUBSTANZPROBE SOWIE VERSCHWEISSTEN FLACHZUGPROBEN



4.11 MIKROSKOPIERUNG DER BRUCHFLÄCHE



4.12 VERSUCHSREIHE DER VERSCHWEISSTEN ZUGPROBEN



4.13 PROBEBRUCHSTELLEN IM SUBSTRAT

Schweißnaht geführt hat (vgl. Abbildung 4.11). Da der pulverförmige Ausgangswerkstoff dazu neigt die Umgebungsfeuchte zu binden, ist in LPBF-Bauteilen ein wesentlich höherer Wasserstoffgehalt als in Aluminiumhalbzeugen zu beobachten. Bei Wiederaufschmelzen des Materials kommt es zum Ausgasen des Wasserstoffs, der sich in Form von Poren in der Schmelze ablagert (Emmelmann et al 2016). Um eine Durchschweißung zu gewährleisten sowie die Porenbildung zu minimieren, wurden im Folgenden verschiedene Maßnahmen vorgesehen. Dies umfasste zum einen die Anpassung der Schweißparameter, als auch die Senkung der Pulverfeuchtigkeit in Anlehnung an (Emmelmann et al 2016) durch die folgenden Maßnahmen:

- Senkung des Feuchtigkeitsgehalts des Ausgangspulvers mithilfe von Trockenbeuteln
- Senkung des Feuchtigkeitsgehalts des Ausgangspulvers während des Bauprozesses
- Reduzierung des Wasserstoffgehalts in gebauter LPBF-Probe durch nachgelagerte Wärmebehandlung

Im ersten Schritt wurde der Ausgangswerkstoff mittels Trockenbeuteln getrocknet. Hierbei konnte die Pulverfeuchtigkeit auf unter 5% gesenkt werden. Eine weitere Trocknung wurde durch eine zusätzliche Belichtung während des Bauprozesses vorgenommen. Hier wurde vor dem eigentlichen Scanvorgang die Bauteilschicht bei geringer Laserleistung (50W statt 350W) und gleicher Scangeschwindigkeit vorbelichtet.

Ein weiterer Optimierungsansatz stellt die Wärmebehandlung der LPBF-Proben dar. Durch die erhöhten Temperaturen sollte die Diffusion des gebundenen Wasserstoffs im Gegensatz zur Raumtemperatur verbessert werden. Die Temperatur wurde mit 550°C (20K unterhalb der Schmelztemperatur) bei einer Haltezeit von 5h so gewählt, dass die Diffusionsvorgänge stark beschleunigt werden.

Eine alternative Wärmebehandlung bei geringerer Temperatur (450°C) und geringerer Haltezeit wurde als Vergleich herangezogen, da mit einer deutlichen Festigkeitsabnahme bei der höheren Temperatur gerechnet wurde.

Nach der Durchführung der beschriebenen Maßnahmen wurden die Probenhälften verschweißt und geprüft. Die anschließend durchgeführten Zugprüfungen werden in Abbildung 4.12 dargestellt und im Folgenden erläutert:

Zunächst lassen sich zwei Spannungsniveaus der Zugfestigkeit bei ca. 140MPa und ca. 170MPa beobachten. Diese können den beiden eingesetzten Wärmebehandlungen bei 450 °C und 550°C zugeordnet werden. Eine Wärmebehandlung bei 550°C führt demnach zu einem stärkeren Abfall der Zugfestigkeit (~140MPa bei 550°C zu ~390MPa Substanzprobe unbehandelt). Im Vergleich zu den vorangegangenen Versuchsreihen zeigt sich eine deutliche Steigerung der Bruchdehnung von <5% auf 18-34%. Das Versagen tritt anders als zuvor nicht mehr in der Schweißnaht, sondern in unmittelbarer Nähe zur Schweißnaht oder im Substrat auf (vgl. Abbildung 4.11). Ein Zusammenhang zwischen der Position des Bruchs und mechanischen Kennwerten kann dabei nicht gezeigt werden.

Durch den Einsatz einer Doppelbelichtungsstrategie deutet sich eine größere Streuung im Bereich der Bruchdehnung an. Jedoch kann kein signifikanter Unterschied zu den herkömmlich belichteten Proben beobachtet werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es bei per Laserschweißen gefügten LPBF-Bauteilen aus AlSi10Mg zu einer deutlichen Abnahme der Festigkeit, sowie zu einem spröden Materialverhalten kommt. Die im Rahmen des Vorhabens untersuchten Maßnahmen führten zu einer Erhöhung der Bruchdehnung. Die Festigkeit des Ausgangsmaterials konnte hierdurch nicht erreicht werden. Um eine möglichst hohe Verbindungsfestigkeit zu erreichen, sollte die Fügstellengeometrie so gestaltet werden, dass eine möglichst flächige Verbindung zwischen Schweißzusatz und Bauteil erreicht wird. Dies kann beispielsweise durch die Verwendung von Fasen erreicht werden. Das beobachtete spröde Materialverhalten mit frühzeitigem Versagen in der Fügstelle kann durch eine nachgelagerte Wärmebehandlung bei 450°C positiv beeinflusst werden.



PROJEKT-ANSPRECHPARTNER BEI H&H
MARKUS HOFFMANN
 GESCHÄFTSFÜHRER
 M.HOFFMANN@HUH.DE

AUTOREN: KAI BAUMEISTER & MARKUS SCHOLL

FALLBEISPIEL SCHÜBEL: ADDCASTING

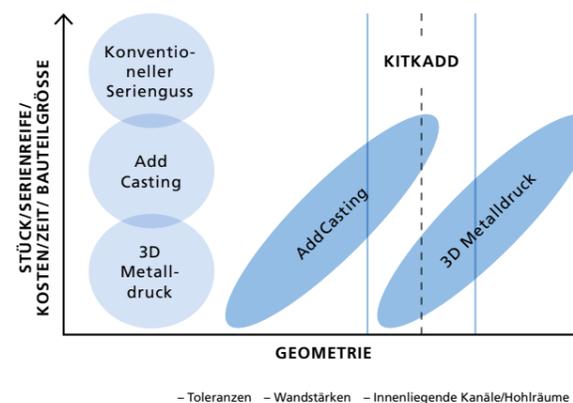
HYBRIDE FERTIGUNG MODULARISierter BAUTEILE

Komplexe Bauteilgeometrien erfordern innovative Fertigungsverfahren und Prozesse. Steigende Anforderungen an Bauteile, vor allem im Maschinen- und Fahrzeugbau, erfordern das ständige Ausreizen der Grenzen der verfügbaren Fertigungsverfahren und -technologien. Darüber hinaus soll die Kombination von Herstellungstechnologien die Chance eröffnen, die vorher gesetzten Grenzen zu sprengen. Gewohnte Prozesse werden überdacht, womöglich verworfen und neu zusammengestellt, um die Nachteile von Fertigungsverfahren auszuschließen und die Vorteile zur Wirkung kommen zu lassen. Dadurch entstehen neue Fertigungsprozessketten, die wiederum neue Anforderungen an die eingesetzten Verfahren stellen.

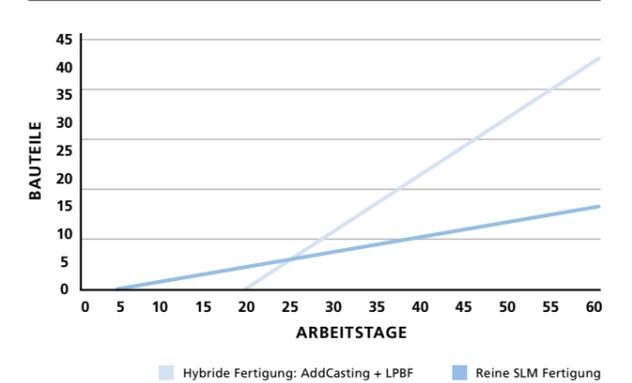
Eine Turbinenschaufel setzt sich vereinfacht ausgedrückt aus einem massiven Fuß und einer filigranen, mit feinen, innenliegenden Kanälen versehenen Schaufel zusammen. Die beiden Module stellen unterschiedliche fertigungstechnische Herausforderungen dar. Das bisher eingesetzte Wachs ausschmelz-Gießverfahren kommt in Hinblick auf die Abbildung der komplexeren werdenden, innenliegenden Kanäle an seine Grenzen, weswegen der Schritt zur additiven Herstellung dieser Geometrie als nötig erscheint. Nachteilig ist, dass die Herstellung des massiven Schaufelfußes über ein LPBF hohe Kosten verursacht und zeitintensiv ist.

ADDCASTING ALS MÖGLICHKEIT FÜR DIE HYBRIDE FERTIGUNG

Für die Herstellung dieses Moduls wendet Schübel Primeparts das AddCasting-Verfahren an. Dieses Verfahren erfüllt die Schnittstellenfunktion zwischen rein konventioneller und rein additiver Fertigung ideal. Mit AddCasting können sowohl massive, große Geometrien als auch gleichzeitig filigrane, innenliegende Kanäle realisiert werden. Dabei ist nicht nur die reine Machbarkeit das Ziel



4.14 VERFAHRENSVERGLEICH



4.15 ZEITLICHER BENEFIT DER HYBRIDEN FERTIGUNG MIT ADDCASTING

im Forschungsprojekt, sondern auch das Aufzeigen der ökonomischen Potenziale, die sich durch das AddCasting-Verfahren ergeben (vgl. Abbildung 4.14).

AddCasting ermöglicht bereits heute die wirtschaftliche Herstellung von Metallguss-Serien von Bauteilen, die additiv gedacht sind. Additiv-hergestellte Urmodelle ermöglichen in Verbindung mit dem Feingussverfahren die stützenlose Herstellung von Bauteilen mit stark ausgeprägten Hinterschnidungen, Kammern und Kanälen. Die Machbarkeitsgrenze wird lediglich durch die Gießbarkeit bestimmt. Somit ermöglicht das AddCasting-Verfahren je nach Bauteilgeometrie eine Alternative zum LPBF. Es ist für derartige Geometrien das optimale Verfahren um komplexe Gussstrukturen im Rahmen einer hybriden Fertigung eines Bauteils zu realisieren.

ZEITLICHER BENEFIT DER HYBRIDEN FERTIGUNG MIT ADDCASTING

Vergleicht man die zeitlichen Verläufe in der Herstellung der kompletten Schaufel über das rein additive LPBF-Verfahren und über das hybride Verfahren AddCasting+LPBF ergibt sich ein Vorteil für das hybride Verfahren ab einer Bauteilstückzahl von 7 (vgl. Abbildung 4.15).

Die lange Herstellungszeit für die gesamte Schaufel von 4 Tagen im reinen LPBF Verfahren ergibt bei höheren Stückzahlen einen signifikanten zeitlichen Nachteil. Die hybride Fertigung ermöglicht das erste Teil nach 22 Tagen und ein weiteres Teil pro Folgetag. Zum Zweck der Vergleichbarkeit wurde angenommen, dass pro Maschine nur 1 AddCasting-Modell, beziehungsweise 1 LPBF-Bauteil pro Tag gedruckt wird. Beachtet man, dass im AddCasting-Verfahren pro Bau-Job jedoch bis zu zwölf Modelle gleichzeitig gedruckt werden können, sind darüber hinaus erhebliche Vorteile durch eine Kostendegression zu erreichen.

HYBRIDE FERTIGUNG SCHAUFELFUSS



4.16 PROZESSKETTE – HYBRIDE FERTIGUNG VOM MODELL ZUM BEARBEITETEN GUSSTEIL

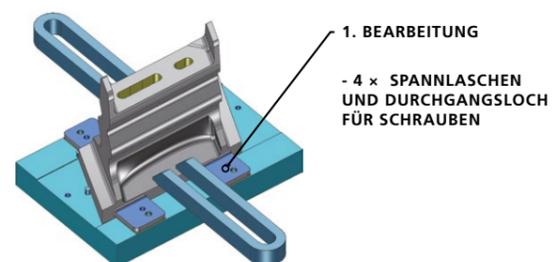
PROZESSKETTE – HYBRIDE FERTIGUNG VOM MODELL ZUM BEARBEITETEN GUSSTEIL

Nach der Entscheidung zu einer Modularisierung eines Bauteils und der Wahl der Verfahren und Parameter beginnt die Fertigung mit der Aufbereitung der CAD-Daten. Das AddCasting-Modell wird mit einem Faktor von 1,8% für den Gießwerkstoff Inconel 718 beaufschlagt. Dem folgt die Triangulierung des CAD-Körpers und die Erstellung eines Baujobs zur Vorbereitung des Druckverfahrens über ein Polymethylmethacrylat (PMMA) Binderjet-Verfahren. Das pulverbasierte Verfahren ermöglicht die stützenfreie Modellherstellung. Nachbehandlungsprozesse beschränken sich auf das Entfernen des losen PMMA-Pulvers von der Modellgeometrie und die anschließende Oberflächenveredelung.

Die maßlichen Abweichungen des Modells bewegen sich im Bereich der DIN 2768 f. Anschließend wird mit Hilfe des Modells in der Gießerei über das konventionelle Feingussverfahren ein Rohgussteil hergestellt (vgl. Abbildung 4.16).

AUFNAHME DER KOMPLEXEN SCHAUFELFUSS-GEOMETRIE FÜR DIE NC-BEARBEITUNG

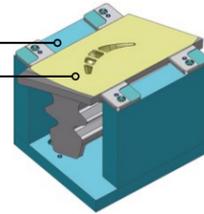
Die additive Fertigung, auch in der hybriden Prozesseinbindung, ist ein Einzelfertigungsverfahren. Eine besondere Herausforderung in der Prozesskette besteht demnach darin, den Rohgusskörper trotz pro Bauteil abweichender Fertigungsgenauigkeiten wiederholgenau auf einer NC-Bearbeitungsmaschine auszurichten. An der Schnittstelle zwischen konventionellen und additiven Fertigungsverfahren liegen eng-tolerierte Geometrien in Form der Kühlkanäle. Der additive Aufbau muss die Kanäle möglichst exakt treffen, um Beeinträchtigungen der Strömungseigenschaften so gering wie möglich zu halten. Für das Bauteil ist eine Aufnahme konzipiert worden, die, ähnlich wie ein Nullpunktspannsystem, über die identischen Fixier-



4.17 WERKSTÜCKTRÄGER FÜR UNTERSEITIGE BEARBEITUNG AUF CNC-FRÄSMASCHINE

2. BEARBEITUNG

- 4 x SPANNLASCHEN OBERSEITE
- OBERFLÄCHE FÜR AM-AUFBAU
- 4 x ANRISS DER KREUZE ZUR AUSRICHTUNG IM ADDITIVEN PROZESS



4.18 WERKSTÜCKTRÄGER FÜR OBERSEITIGE BEARBEITUNG AUF CNC-FRÄSMASCHINE

punkte jeweils auf der LPBF Maschine und der NC-Fräsmaschine aufgenommen werden kann.

Mögliche Fehler, die durch das Umrüsten von der konventionellen Fräsmaschine auf die LPBF Maschine entstehen können, sollen so möglichst gering gehalten werden.

Der Ablauf der Bearbeitung nach der Rohgussherstellung im Feingussverfahren wird in den folgenden Schritten durchgeführt:

- **Bearbeitung der Rückseite der Spannlaschen auf der CNC Fräsmaschine und die Einbringung der Aufnahmebohrungen und Auflageflächen (vgl. Abbildung 4.18)**
- **Umrüsten des Gusskörpers und Ausrichtung über die Aufnahmebohrungen und Auflageflächen auf der Fräsvorrichtung**
- **Planfräsbearbeitung der Oberseite des Schaufelfußes als Vorbereitung für den später folgenden additiven Aufbau**
- **Einarbeitung zusätzlicher Flächen inklusive dem Anreißen von vier Kreuzen auf den Spannlaschen des Schaufelfußes. Die Kreuze dienen zur Optimierung der Ausrichtung der LPBF Maschine zum Schaufelfuß-Grundkörper. Das Ziel, die aus dem Gusskörper austretenden Kühlkanäle so genau wie möglich zu treffen soll damit wahrscheinlicher werden (vgl. Abbildung 4.18).**

Durch dieses Vorgehen konnte maßgeblich zum hybriden Aufbau der Turbinenschaufel beigetragen werden.

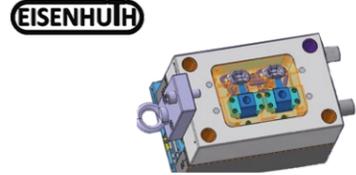
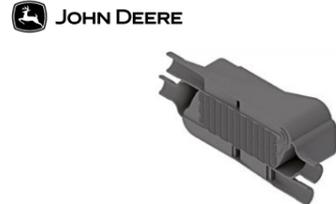


**PROJEKT-ANSPRECHPARTNER
BEI SCHÜBEL**
KAI BAUMEISTER
MODELLBAUERMEISTER
BAUMEISTER@PRIMEPARTS.DE



**PROJEKT-ANSPRECHPARTNER
BEI SCHÜBEL**
MARKUS SCHOLL
MODELLBAUERMEISTER
SCHOLL@PRIMEPARTS.DE

ZUSAMMENFASSUNG

WERKTEIL	BILD / ZEICHNUNG	WIRKPRINZIP	ENTWICKLUNGSMETHODIK	PROZESSKETTEN	KUNDENVORTEIL	VORTEIL (VGL. ZU REIN AM)	HERAUSFORDERUNG
Turbinenschaufel		Kühlung durch komplexe Kanäle	<ul style="list-style-type: none"> Nachbearbeitung Kanäle Fertigungs- und nachbearbeitungsgerechte Gestaltung für hybride Prozessketten 	<ol style="list-style-type: none"> AM Guss-AM Guss 	<ul style="list-style-type: none"> Wirkungsgrad um 1 – 2 % verbessert* innovative Materialien 	ca. 34 % geringere DLZ ab LG 1000 ca. 10 % geringere Stückkosten	<ul style="list-style-type: none"> Prozesstechnik für hybriden Aufbau Qualitätssicherung
Zahnrad		Dämpfung durch Pulver und Struktur	<ul style="list-style-type: none"> Funktions- und fertigungsgerechte Konstruktion für Kombination mit Sinterprozesskette 	<ol style="list-style-type: none"> AM Sintern-AM Sintern 	<ul style="list-style-type: none"> Geräusch- und Dämpfungsoptimiert, günstiger, präzisere Verzahnung 	ca. 20 – 45 % geringere DLZ ca. 67 – 71 % geringere Stückkosten	<ul style="list-style-type: none"> Wirkprinzip Benchmark
Spritzgusswerkzeug		Konturnahe Kühlung / Bionische Struktur	<ul style="list-style-type: none"> Volumenreduzierung Nachbearbeitung innenliegender Kanäle 	<ol style="list-style-type: none"> AM 	<ul style="list-style-type: none"> 32 % geringere Spritzgussstückkosten 45 % schnellere Spritzguss-DLZ 	–	Nachbearbeitung innerer Strukturen
Kühler		Wärmeübertrag durch filigrane Strukturen	<ul style="list-style-type: none"> Minimale Wandstärke und Kanalmaße Nachbearbeitungsgerechte Gestaltung (Pulverentfernung) 	<ol style="list-style-type: none"> AM 	<ul style="list-style-type: none"> Gleiche Leistung bei ca. 1/5 des Bauraums 	–	<ul style="list-style-type: none"> Auslegung der Kühlergeometrie Fertigungskosten und Mehrwerte
Sonnenrad		Ölförderung durch komplexe Struktur	<ul style="list-style-type: none"> Funktions- und fertigungsgerechte Konstruktion 	<ol style="list-style-type: none"> Fräsen-AM Fräsen AM 	<ul style="list-style-type: none"> Verbesserte Schmierung mit Öl und dadurch erhöhte Laufzeit 	ca. 42 – 73 % geringere DLZ ca. 41 – 74 % geringere Stückkosten	<ul style="list-style-type: none"> Wirkprinzip erst ab hohen Drehzahlen Fertigungskosten und Durchlaufzeiten

ÜBERBLICK & AUSBLICK

Die konstruktive Auslegung, die produktionstechnische Planung und Bewertung sowie das messtechnische Absichern der hybriden Prozessketten im Rahmen dieses Projekts haben vielfältige Erkenntnisse gebracht. Sicher ist, dass hybride Prozessketten hohe technologische Anforderungen an die Konstruktion und Produktionstechnik mit sich bringen, denen mit entsprechender Qualifikation und entsprechendem Aufwand begegnet werden kann. Sicher ist auch, dass derartige hybride

Prozessketten ein hohes wirtschaftliches Potential gegenüber rein additiver Fertigung aufweisen. Die obige Tabelle stellt die Ergebnisse dieses Projekts zusammenfassend dar. Die Herausforderungen für die Zukunft bestehen einerseits in der notwendigen Qualifikation um die technologische Umsetzung hybrider Prozessketten zu befähigen. Dies beginnt bei der ingenieurstechische Konstruktionslehre und endet bei der finalen Umsetzung in produktionstechnischen Anlagen. An-

dererseits ist die Verbreitung der wirtschaftlichen und technischen Erkenntnisse ebenso wichtig und daher das Ziel dieser und anderer Veröffentlichung im Rahmen des BMBF Projekts KitkAdd. Abschließend lässt sich festhalten, dass mit den Projektergebnissen ein deutlicher Beitrag zu der technischen und wirtschaftlichen Anwendung von hybrid-additiven Prozessketten geleistet wurde, der sich zukünftig weiter verbreiten wird.

LITERATURVERZEICHNIS

PROJEKTBEZOGENE PUBLIKATIONEN

Eschner, N.; Kopf, R.; Lieneke, T.; Künneke, T.; Berger, D.; Häfner, B.; Lanza, G. & Zimmer, D. (2017), „Kombination etablierter und additiver Fertigung“, ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Band 112, S. 469 – 472. <https://doi.org/10.3139/104.111751>

Eschner, N.; Lingenhöhl, J.; Öppling, S. & Lanza, G. (2018), „Prozessüberwachung beim Laser- Strahlschmelzen mit akustischen Signalen“, wt-online 11/12, S. 818 – 823.

Eschner, N.; Weiser, L.; Häfner, B. & Lanza, G. (2018), „Development of an Acoustic Process Monitoring System for the Selective Laser Melting (SLM)“. Solid Freeform Symposium – Proceedings, Hrsg. SFF Symposium, S. 2097 – 2117.

Eschner, N.; Weiser, L.; Häfner, B. & Lanza, G. (2019), „Akustische Prozessüberwachung für das Laserstrahlschmelzen (LBM) mit neuronalen Netzen: Eine Potentialbewertung“, tm – Technisches Messen, Nr. 11, S.

Jacob, A.; Windhuber, K.; Ranke, D. & Lanza, G. (2018), „Planning, Evaluation and Optimization of Product Design and Manufacturing Technology Chains for New Product and Production Technologies on the Example of Additive Manufacturing“, Procedia CIRP, Bd. 70, S. 108 – 113.

Jacob, A.; Künneke, T.; Lieneke, T.; Baumann, T.; Stricker, N.; Zimmer, D. & Lanza, G. (2018), „Iterative Produktentwicklung und Produktionsplanung für die Additive Fertigung“, ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, S. 742 – 745. <https://doi.org/10.3139/104.112005>.

Jacob, A.; Hillermeier, M. & Lanza, G. (2019), „Fabrikplanung für die additive Fertigung“, wt online, Band 4, S. 278 – 283.

Jacob, A.; Steimer, S.; Stricker, N.; Häfner, B. & Lanza, G. (2019), „Integrating product function design, production technology optimization and process equipment planning on the example of hybrid additive manufacturing“, Procedia CIRP, Bd. 86, S. 222 – 227."

Lieneke, T.; Künneke, T.; Schlenker, F.; Denzer, V. & Zimmer, D. (2019), „Manufacturing Accuracy In Additive Manufacturing: A Method To Determine Geometrical Tolerances“, Proceedings of the Special Interest Group meeting on Advancing Precision in Additive Manufacturing.

Künneke, T.; Lieneke, T.; Lammers, S. & Zimmer, D. (2019), „Design guidelines for post-processing of laser beam melting in context of support structures“, Proceedings of the Special Interest Group meeting on Advancing Precision in Additive Manufacturing.

Künneke, T.; Bücken, S.; Lieneke, T. & Zimmer, D. (2018), „Ein Beitrag zur Anpassung bestehender Konstruktionsmethodiken an die additiven Fertigungsverfahren“ in Rapid.Tech + FabCon 3.D – International Trade Show & Conference for Additive Manufacturing. Proceedings of the 15th Rapid.Tech Conference, Erfurt, Germany, 5 – 7 June 2018, Hrsg. M. Kynast, M. Eichmann & G. Witt, Hanser, München, S. 128 – 143.

Lieneke, T.; Denzer, V. & Zimmer, D. (2017), „Geometrische Toleranzen für additive Fertigungsverfahren“ in Summer School Toleranzmanagement: Beiträge zur 3. Summer School September 2017, Hrsg. Universität Erlangen-Nürnberg, Vögel Verlag, Erlangen-Nürnberg.

SONSTIGE LITERATUR

Adam, G. A. O. (2015), Systematische Erarbeitung von Konstruktionsregeln für die additiven Fertigungsverfahren Lasersintern, Laserschmelzen und Fused Deposition Modeling. Dissertation, Universität Paderborn, Fakultät für Maschinenbau.

Emmelmann, C.; Wandtke, K. & Beckmann, F.(2016), Neue Leichtbaukonzepte für den Fahrzeugbau durch Laserfüge- und 3D-Druckverfahren, DVS.

IMPRESSUM

HERAUSGEBER



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)



wbk Institut für Produktionstechnik

Kaiserstraße 12
76131 Karlsruhe

www.kit.edu
Karlsruhe © KIT 2020

AUTOREN

Das KitkAdd-Team:

Kai Baumeister
Niclas Eschner
Rami Faroun
Thorsten Hickmann
Markus Hoffmann
Alexander Jacob
Thomas Künneke
Tobias Lieneke
Martin Schäfer
Markus Schöll
Philipp Surrey

ISBN

978-3-00-065337-7

GESTALTUNG & SATZ

grundmanngestaltung
Agentur für Design & Marken,
Karlsruhe

STAND

März 2020

BILDNACHWEIS

S. 4.1: Das KitkAdd-Konsortium (Universität Paderborn – Johannes Pauly);
S 6.1: Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza; S 6.2: Prof. Dr. Detmar Zimmer; S 6.3: Martin Schäfer; S 13.1: Turbinenschaufel (Siemens); S 13.2: Zahnrad (GKN); S 13.3: Kraftstoffkühler (John Deere); S 13.4: Spritzgusseinsätze (Eisenhuth); S 15 – 21: KAT; S 22 – 23: Siemens, KAT; S 24 – 27: GKN; S 28 – 31: John Deere, KAT; S 32 – 33: KIT, wbk; S 34 – 37: Siemens; S 38 – 39: GKN; S 40 – 41: John Deere; S 42 – 44: Eisenhuth; S 46 – 48: KIT, wbk; S 49 – 50: H&H; S 51 – 52: Schübel; S. 54.1: Turbinenschaufel (Siemens); S. 54.2: Zahnrad (GKN); S. 54.3: Spritzgusswerkzeug (Eisenhuth); S. 54.4: Kühler (John Deere); S. 54.5: Sonnenrad (John Deere).

Unser Dank für die gute Mitarbeit gilt allen Partnern, die im Projekt KitkAdd mitgewirkt haben. Das Projekt wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert (Förderkennzeichen 02P15B010 bis 02P15B017) und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

BETREUT VOM



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie



ISBN 978-3-00-065337-7



9 783000 653377